

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Torer

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Ivan Torer

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivići Garašiću, dipl. ing. te asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. na pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje kao i Laboratoriju za alatne strojeve jer su mi izašli u susret i omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Ivan Torer



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN TORER** Mat. br.: 0035181542

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA MAG CBT POSTUPKA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF MAG CBT PROCESS FOR WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu analizirati prijenos metala postupkom MAG CBT-*Controlled bridge transfer* i usporediti s konvencionalnim prijenosom kratkim spojevima. Opisati tehnologiju aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te ocijeniti prikladnost pojedinih postupaka zavarivanja za realne aplikacije.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi plan pokusa za optimalizaciju parametara MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Odrediti odgovarajuće dodatne materijale i zaštitne plinove te prihvatljive razine unosa topline. Posebno analizirati stabilnost prijenosa metala i utjecaj dinamike luka na formiranje slojeva. Ispitati mehanička svojstva načinjenog izratka te usporediti sa specificiranim svojstvima dodatnog materijala. U konačnici ocijeniti prikladnost definiranih parametara MAG CBT za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualno dobivena pomoć.

Zadatak zadan:
9. ožujka 2017.

Rok predaje rada:
11. svibnja 2017.

Predviđeni datum obrane:
17., 18. i 19. svibnja 2017.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA	VIII
POPIS FIZIKALNIH VELIČINA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
2. MAG ZAVARIVANJE	3
2.1. Parametri kod MAG zavarivanja	5
2.1.1. Jakost struje.....	5
2.1.2. Napon električnog luka.....	6
2.1.3. Utjecaj zaštitnog plina.....	6
2.1.4. Brzina zavarivanja.....	7
2.1.5. Slobodni kraj žice.....	8
2.1.6. Induktivitet.....	8
2.2. Vrste prijenosa metala u električnom luku.....	10
2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima.....	10
2.2.2. Prijenos metala prijelaznim lukom.....	12
2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom.....	13
2.2.4. Prijenos metala impulsnim lukom.....	14
3. MAG CBT (engl. Controlled Bridge Transfer).....	16
3.1. Izvori struje kod CBT MAG zavarivanja.....	19
3.2. CBT-EN (engl. Electrode Negative) postupak.....	21
3.3. CBT-AC (engl. Alternative Current) postupak.....	22
3.4. CBT-EX (engl. Expanded) postupak.....	23
4. WAAM (engl. Wire And Arc Manufacturing) postupak.....	25

4.1.	Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing – AM).....	25
4.2.	Općenito o WAAM (engl. Wire And Arc Manufacturing).....	28
4.3.	Problemi koji nastaju kod WAAM postupka zavarivanja.....	30
4.4.	Materijali kod WAAM-a.....	32
4.4.1.	Titan.....	32
4.4.2.	Aluminij.....	34
4.5.	Primjena WAAM-a.....	36
5.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	40
5.1.	Opis eksperimenta.....	40
5.2.	Oprema za zavarivanje.....	41
5.2.1.	Izvor struje za zavarivanje.....	42
5.2.2.	Modul za precizno linijsko vođenje.....	44
5.2.3.	Dodatni materijal (žica za zavarivanje) i osnovni materijal.....	45
5.2.4.	Parametri zavarivanja.....	46
5.3.	Ispitivanja uzoraka 1 i 2.....	54
5.3.1.	Makroanaliza.....	56
5.3.2.	Mjerenje tvrdoće.....	58
5.3.3.	Statičko vlačni pokus.....	63
6.	ZAKLJUČAK.....	69
	LITERATURA.....	70
	PRILOZI.....	73

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [4]	3
Slika 2.	Oprema za MAG zavarivanje [5]	4
Slika 3.	Utjecaj jakosti struje zavarivanja na geometriju zavara [7]	5
Slika 4.	Ravna karakteristika izvora struje za MAG [8].....	6
Slika 5.	Utjecaj brzine zavarivanja na oblik zavara [7]	7
Slika 6.	Slobodni kraj žice [7].....	8
Slika 7.	Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojem [12].....	10
Slika 8.	Prikaz odvajanja jedne kapljice metala s pratećim dijagramima [13].....	11
Slika 9.	Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [12].....	12
Slika 10.	Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [12].....	13
Slika 11.	Shematski prikaz prijenosa metala impulsnim lukom [14].....	14
Slika 12.	Princip CBT MAG postupka zavarivanja [15].....	16
Slika 13.	Predviđanje trenutka ponovne uspostave električnog luka ovisno o naponu [16].	18
Slika 14.	Faze prijenosa CBT metala snimljene visokobrzinskom kamerom [17].....	19
Slika 15.	Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i pri negativnom polu [17]...	21
Slika 16.	Prijenos metala kod CBT-AC postupka u realnom vremenu [19].....	22
Slika 17.	Princip rada CBT-EX MAG postupka zavarivanja [18].....	23
Slika 18.	Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT-EX MAG i konvencionalnog MAG zavarivanja [18].....	24
Slika 19.	Kvalitativno stanje proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na uobičajene postupke [21].....	27
Slika 20.	Podjela postupaka aditivne proizvodnje za metale [23].....	28
Slika 21.	Zid izrađen WAAM postupkom[24].....	28
Slika 22.	Osnovna i dodatna oprema za WAAM postupak [25].....	29
Slika 23.	Shematski prikaz valjanja [24].....	30
Slika 24.	Rotor izrađen WAAM postupkom [28].....	37
Slika 25.	Model krila izrađen WAAM postupkom [26].....	37
Slika 26.	Dio velike složenosti izrađen WAAM postupkom [29].....	38
Slika 27.	Polukružna konstrukcija izvedena WAAM postupkom [28].....	38
Slika 28.	Potporna konstrukcija krila zrakoplova od Ti6Al4V [30].....	39

Slika 29.	Čelični stožac [26].....	39
Slika 30.	Oprema za WAAM postupak zavarivanja [31].....	41
Slika 31.	Izvor struje Welbee P500L [31].....	42
Slika 32.	Odabrani parametri kod eksperimenta [31].....	43
Slika 33.	Bug-O Systems MDS - 1002 uređaj [31].....	44
Slika 34.	Specifikacije žice EZ-SG 2 [33].....	45
Slika 35.	Prikaz načina na koji je pričvršćen osnovni materijal na radnu ploču [31].....	46
Slika 36.	Prikaz načina na koji je pričvršćen osnovni materijal na radnu ploču [31].....	46
Slika 37.	Mjerenje temperature međuprolaza [31].....	47
Slika 38.	Mjerenje visina zavara - uzorak 1.....	50
Slika 39.	Mjerenje visine zavara - uzorak 2.....	50
Slika 40.	Uzorak 1 - 1. prolaz [31].....	51
Slika 41.	Uzorak 1 - 5. prolaz [31].....	51
Slika 42.	Uzorak 1 - 10. prolaz [31].....	52
Slika 43.	Uzorak 1 - 15. prolaz [31].....	52
Slika 44.	Uzorak 1 - 20. prolaz [31].....	52
Slika 45.	Uzorak 1 - zadnji prolaz [31].....	52
Slika 46.	Uzorak 2 - 1. prolaz [31].....	53
Slika 47.	Uzorak 2 - 5. prolaz [31].....	53
Slika 48.	Uzorak 2 - 10. prolaz [31].....	53
Slika 49.	Uzorak 2 - 15. prolaz [31].....	53
Slika 50.	Uzorak 2 - 20. prolaz [31].....	54
Slika 51.	Uzorak 2 - zadnji prolaz [31].....	54
Slika 52.	Shematski prikaz uzoraka i označenih krajeva.....	55
Slika 53.	Prikaz krajeva uzorka 1 pripremljenih za makroanalizu [31].....	55
Slika 54.	Prikaz krajeva uzorka 2 pripremljenih za makroanalizu [31].....	55
Slika 55.	Makroanaliza uzorka 1 - kraj 1 [31].....	56
Slika 56.	Makroanaliza uzorka 2 - kraj 2 [31].....	57
Slika 57.	Makroanaliza uzorka 1 - kraj 3 [31].....	57
Slika 58.	Makroanaliza uzorka 2 - kraj 4 [31].....	58
Slika 59.	Uzorak 1 - kraj 1 [31].....	59
Slika 60.	Uzorak 2 - kraj 2 [31].....	59

Slika 61.	Uzorak 1 - kraj 3 [31].....	59
Slika 62.	Uzorak 2 - kraj 4 [31].....	59
Slika 63.	Dijagram rezultata tvrdoće uzorka 1.....	62
Slika 64.	Dijagram rezultata tvrdoće uzorka 2.....	62
Slika 65.	Pripremljeni i označeni uzorci za izradu ispitnih epruveta [31].....	63
Slika 66.	Dimenzije ispitnih epruveta prije ispitivanja [34].....	64
Slika 67.	Dimenzije ispitnih epruveta nakon ispitivanja [34].....	64
Slika 68.	Ispitne epruvete (uzorak 1 – gornja, uzorak 2 – donja) [31].....	65
Slika 69.	Kidalica i uzorak 1 postavljen za testiranje [31].....	66
Slika 70.	Uzorak 1 nakon testiranja [31].....	66
Slika 71.	Uzorak 2 nakon testiranja [31].....	66
Slika 72.	Dijagram naprezanja za uzorak 1 [31].....	67
Slika 73.	Dijagram naprezanja za uzorak 2 [31].....	68

POPIS TABLICA

Tablica 1. Plinovi koji se koriste kod MIG/MAG zavarivanja [9].....	7
Tablica 2. Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju [11].....	18
Tablica 3. Klasifikacija digitalnih invertera [18].....	20
Tablica 4. Prednosti i nedostaci aditivnog postupka s tehnološkog i ekonomskog gledišta [22].....	26
Tablica 5. Najčešći materijali kod WAAM-a [20].....	32
Tablica 6. Kemijski sastav legure Ti6Al4V [27].....	33
Tablica 7. Mehanička svojstva legure Ti6Al4V [27].....	33
Tablica 8. Vrste legura aluminija [27].....	34
Tablica 9. Karakteristike Welbee P500L izvora struje za zavarivanje[32].....	43
Tablica 10. Parametri zavarivanja kod uzorka 1.....	48
Tablica 11. Parametri zavarivanja kod uzorka 2.....	49
Tablica 12. Mjerenje tvrdoće uzorka 1 - kraj 1.....	60
Tablica 13. Mjerenje tvrdoće uzorka 1 - kraj 3.....	60
Tablica 14. Mjerenje tvrdoće uzorka 2 - kraj 2.....	61
Tablica 15. Mjerenje tvrdoće uzorka 2 - kraj 4.....	61

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
AM	Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing)
Ar	Argon
BTF	Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda (engl. Buy-To-Fly)
CBT	Prijenos metala sa smanjenom pojavom štrcanja (engl. Controled Bridge Transfer)
CBT-AC	Prijenos metala kod kojeg se koristi izmjenična struja s malom frekvencijom izmjene pozitivnog i negativnog pola (engl. Alternative Current)
CBT-EN	Prijenos metala sa žicom spojenom na negativni pol (engl. Electrode negative)
CBT-EX	Krupnokapljičasti prijenos metala (engl. Expanded)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (engl. Computer Aided Design)
CAM	Računalom podržana priprema za proizvodnju (engl. Computer Aided Manufacturing)
CNC	Računalom numerički upravljani strojevi (engl. Computer Numerical Control)
CO ₂	Ugljični dioksid
Cu	Bakar
CV	Ravna statička karakteristika (engl. Constant Volfage)
CMT	Hladni prijenos metala (engl. Cold Metal Transfer)
3D	Tri dimenzije (engl. Three-Dimensional)
DC	Istosmjerna struja (engl. Direct Current)
EBM	Taljenje s pomoću snopa elektrona
Fe	Željezo

LASER	Uređaj za stvaranje i pojačavanje koherentnog elektromagnetskog, najčešće monokromatskog, usko usmjerenog zračenja (engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
LENS	Lasersko taloženje metala do gotovog oblika
MIG/MAG	Elektrolučno zavarivanje inertnog/aktivnog plina (engl. Metal Inert/Active GAS)
MAGi	Prijenos metala prijelaznim lukom kod MAG (engl. Mixed Arc)
MAGk	Prijenos metala kratkim spojevima kod MAG (engl. Short Arc)
MAGp	Prijenos metala impulsnim lukom kod MAG (engl. Pulsed Arc)
MAGs	Prijenos metala štrcajućim lukom kod MAG (engl. Spray Arc)
Mg	Magnezij
Mn	Mangan
O ₂	Kisik
SAD	Sjedinjene Američke Države
SSSR	Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika
Si	Silicij
SLM	Selektivno lasersko taljenje (engl. Selective Laser Melting)
TIG	Elektrolučno zavarivanje volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. Tungsten Inert Gas)
V	Volfram
WAAM	Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. Wire And Arc Additive Manufacturing)
WLAM	Aditivna proizvodnja žicom i laserom (engl. Wire And Laser Additive Manufacturing)
Zn	Cink
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezljivost
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
I	A	Jakost struje zavarivanja
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p\ 0,2}$	N/mm ²	Konvencionalna granica razvačenja
U	V	Napon zavarivanja
V_i	m ³	Volumen početnog sirovca
V_f	m ³	Volumen konačnog proizvoda
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
Q	kJ/cm	Unos topline pri zavarivanju

SAŽETAK

U teorijskom dijelu je analiziran prijenos metala MAG CBT postupkom te uspoređen s konvencionalnim prijenosom kratkim spojevima. Opisana je tehnologija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM) te prikladnost pojedinih postupaka zavarivanja za realne aplikacije.

U eksperimentalnom dijelu je razrađen plan pokusa za optimizaciju parametara MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (WAAM). Određen je odgovarajući dodatni materijal i zaštitni plinovi te izračunati unosi topline. Napravljena su 2 uzorka istih parametara s različitim brzinama zavarivanja te je napravljena njihova usporedba. Ispitana su mehanička svojstva oba uzorka: statički vlačni pokus i mjerenje tvrdoće. Zatim je napravljena i makroanaliza. Na kraju je ocijenjena prikladnost definiranih parametara MAG CBT za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

Ključne riječi: MAG, CBT, aditivna proizvodnje električnim lukom i žicom

SUMMARY

The theoretical part analyzes the transfer of metal by the MAG CBT method and it is compared with the conventional transfer of short circuits. WAAM production technology and the suitability of some welding procedures for real applications are described and evaluated.

In the experimental section, a plan for the optimization of parameters of the MAG CBT Procedure for Additive Electrical and Welding Procedure (WAAM) was elaborated. Appropriate additional material and protective gases have been determined and heat inputs are calculated. Two samples of the same parameters with different welding speeds were made and compared by their mechanical properties. The mechanical properties of both samples were examined: static tensile test and hardness measurement. Thereafter, another test for macro analysis was carried out. Finally, the suitability of the defined parameters MAG CBT was assessed for the additive production of electric arc and wire.

Key words: MAG, CBT, WAAM

1. UVOD

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istorodnih ili raznorodnih materijala. Provodi se taljenjem ili pritiskom s ili bez dodavanja materijala s ciljem dobiti homogeni zavareni spoj. Zavarivanje se izvodi pomoću različitih izvora energije tako se koristi mlaz vrućih plinova, električni luk, tok nabijenih čestica, tok zračenja (LASER), električna struja, trenje, ultrazvuk i drugo.

Početak zavarivanja bilo je kovačko zavarivanje. Tim su postupkom kovači spajali željezo i čelik zagrijavanjem i udaranjem čekićem. Zatim su se razvili i drugi oblici zavarivanja kao što su elektrolučno zavarivanje i plinsko zavarivanje kisikom. Razvojem znanosti o materijalima i metalurgiji, termodinamici, elektrotehnici, kemiji i informatici razvila se tehnologija zavarivanja. Sve to govori da je zavarivanje interdisciplinarna tehnologija, nezaobilazna tehnologija potrebna čovjeku u industriji.

Složenost i važnost postupka zavarivanja najbolje se može predočiti na primjeru izrade tankera nosivosti 82 000 t na kojemu je zavareno 261,6 km kutnih spojeva i 11,6 km sučeljenih spojeva ili na primjeru postrojenja velike termoelektrane gdje se nalazi od 10 000 do 100 000 zavarenih spojeva cijevi pod tlakom. Sve to dovodi do zaključka da je svaki zavar izuzetno važan te da nema prostora za pogreške. Svaki i najmanji lom, pukotina ili propuštanje mogu biti katastrofalne. Pred tehnologom zavarivanja su postavljeni različiti zahtjevi. Prije svega to su zahtjevi kvalitete i sigurnosti zavarenog spoja na konstrukciji, minimalnih troškova izrade, utroška materijala i energije te onečišćenja okoliša. Stoga je velika pozornost usmjerena prema kvaliteti zavarenog spoja. U ovom slučaju vrijedi izreka:

„Lanac je toliko jak koliko je jaka najslabija karika lanca.“

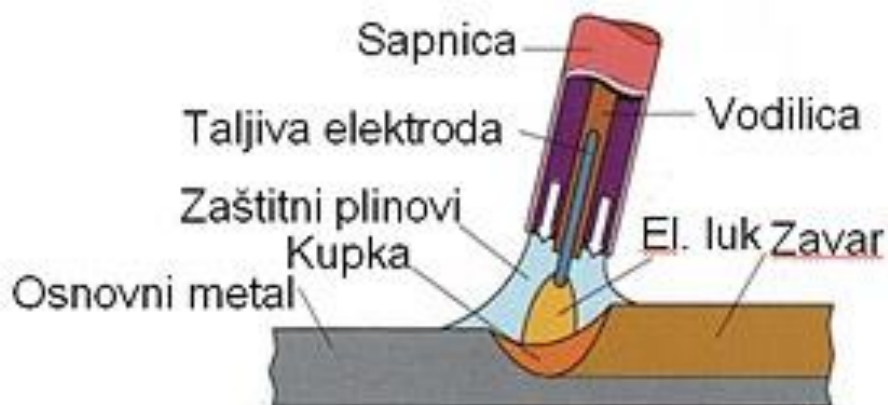
Zadovoljavanjem svih navedenih komponenata razvio se MAG (engl. Metal Active Gas) postupak zavarivanja. MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina. Postupak se razvio poslije Drugog svjetskog rata u SAD-u za potrebe zrakoplovne industrije (tvrtka Airco), a kasnije i u SSSR-u gdje je prvi put upotrijebljen CO₂ kao zaštitni plin umjesto argona. MAG postupak zavarivanja jedan je od najčešće korištenih postupaka spajanja metala. Razvijen je zbog potrebe za produktivnijom i kvalitetnijom izradom zavarenih spojeva, a brzo se proširio zbog pogodnosti za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju procesa.

Prema normi HRN EN ISO 4063, MAG postupku je dodijeljena oznaka 135. Unatoč sedamdesetogodišnjoj povijesti, MAG postupak se i danas kontinuirano unapređuje, u potrazi za što ekonomičnijim i kvalitetnijim zavarivanjem. [1]

Razvojem MAG postupka zavarivanja željela se zadovoljiti visoka razina kvalitete te je eliminiran problem rasprskavanja. Kao rezultat te karakteristike razvio se modificirani postupak CBT (engl. Controlled Bridge Transfer). MAG CBT je modificiran način prijenosa metala gdje CBT tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili eliminacijom prskanja što je važno kod precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline, a sve rezultira i mogućnošću zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima kao i ploča debljina manjih od promjera dodatnog materijala. [2]

2. MAG ZAVARIVANJE

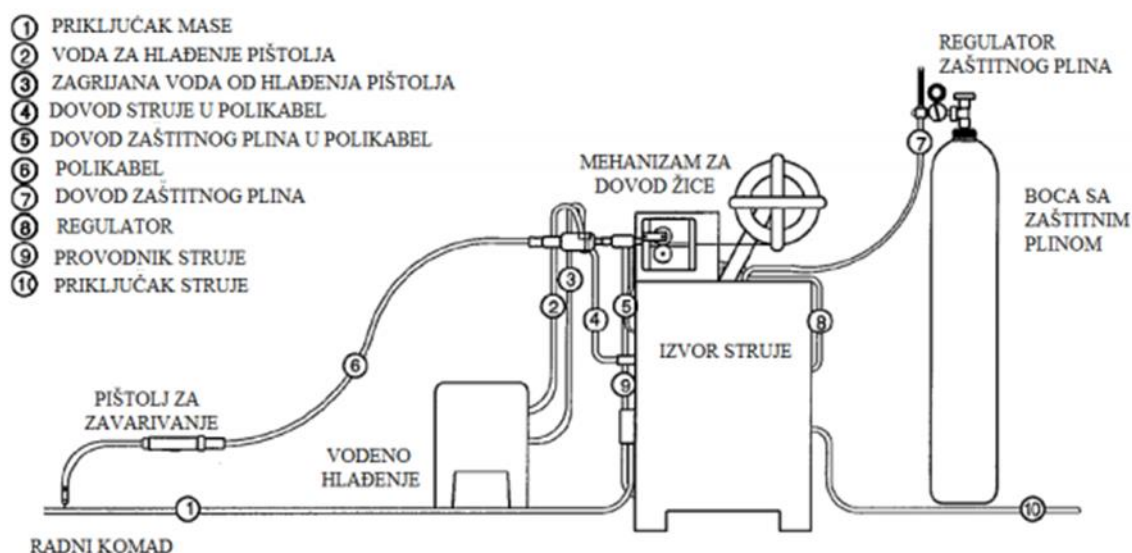
MAG postupak zavarivanja je vrsta elektrolučnog zavarivanja taljenjem elektrode u aktivnom zaštitnom plinu (obično ugljikov dioksid, CO_2) ili u plinskoj smjesi (argon + ugljikov dioksid, argon + ugljikov dioksid + kisik). To je poluautomatski ili automatski postupak zavarivanja koji koristi kontinuirano dovođenje žice kao elektrode za zavarivanje, a zaštićen je aktivnom mješavinom zaštitnih plinova (obično ugljikov dioksid), da zaštiti zavareni spoj od okolne atmosfere. Postupak je produktivniji od ručnog elektrolučnog zavarivanja te ekonomičniji (više kilograma deponiranog materijala u jedinici vremena). Elektroda je ujedno i dodatni materijal, koji obično kemijskim sastavom i mehaničkim svojstvima odgovara osnovnom materijalu koji se zavaruje. Zavarivanje MAG postupkom ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala. [3]



Slika 1. Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [4]

Oprema za MAG postupak zavarivanja:

- izvor istosmjerne s ravnom statičkom karakteristikom CV (engl. Constant Voltage)
- polikabel
- uređaj za hlađenje
- dodavač žice
- boca sa zaštitnim plinom
- pištolj za zavarivanje
- regulator protoka zaštitnog plina.



Slika 2. Oprema za MAG zavarivanje [5]

Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje, koji je priključen na električnu mrežu, putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom koja se kontinuirano i automatski odmatata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin se dovodi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja.

Kontaktna vodilica pištolja, koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja na žicu te sapnica za plin koja služi za dovod zaštitnog plina, potrošni su dijelovi pištolja te ih se lako može zamijeniti. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti). [5]

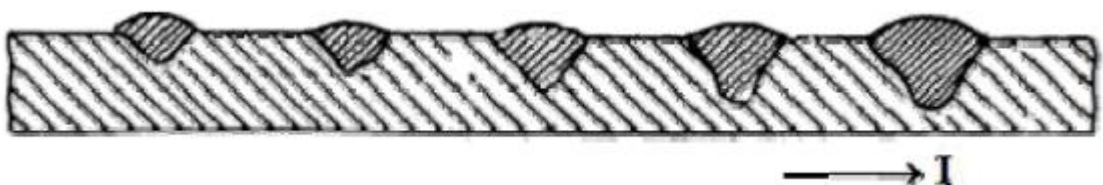
2.1. Parametri kod MAG zavarivanja

Parametri zavarivanja bitan su faktor koji utječu na kvalitetu i izgled zavarenog spoja. Iz tog razloga zavarivač mora biti upoznat s utjecajem ovih veličina na kvalitetu zavarenog spoja kako bi mijenjajući pojedine od njih, mijenjao i uvjete zavarivanja te na taj način postigao optimalne rezultate. Izbor parametara zavarivanja usko je povezan sa sljedećim faktorima: [6]

- kemijski sastav i debljina osnovnog materijala
- kemijski sastav elektrode
- očekivanom kvalitetom zavarenog spoja.

2.1.1. Jakost struje

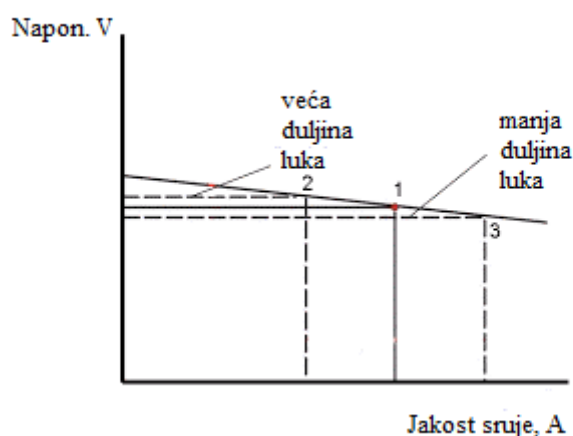
Jakost struje je najvažniji parametar koji ovisi o brzini dovođenja žice, odnosno o koeficijentu taljenja. Što je veća brzina dovođenja žice, to je veća i jakost struje zavarivanja. Povećanje jakosti struje zavarivanja uz nepromijenjene ostale parametre dovodi do povećanja dubine penetracije i nadvišenja zavara, koeficijenta taljenja te povećanja količine taline. [6]



Slika 3. Utjecaj jakosti struje zavarivanja na geometriju zavara [7]

2.1.2. Napon električnog luka

Napon električnog luka jedan je od važnijih parametara kod MAG zavarivanja. Širina i duljina električnog luka direktno ovise o njemu, a podešava se na izvoru struje. Pri bilo kojem iznosu napona, povećanje istog dovodi do povećanja širine zavara te smanjenje penetracije. Isto tako i prijenos metala u električnom luku ovisi o iznosu napona. Uređaji za zavarivanje koriste ravnu karakteristiku izvora struje. Ravna karakteristika je kada izvor struje održava napon struje konstantnim dok se jačina struje mijenja visinom električnog luka. [6]



Slika 4. Ravna karakteristika izvora struje za MAG [8]

2.1.3. Utjecaj zaštitnog plina

Većina metala i njihovih legura u rastaljenom stanju stupa u reakciju s elementima iz zraka i s njima tvori metalne okside. Ti metalni oksidi onečišćuju talinu pri zavarivanju, što dovodi do pojave grešaka u zavarenom spoju te smanjuje mehanička svojstva. Da bi se to izbjeglo, pri zavarivanju se koriste određeni plinovi koji štite zonu zavarivanja od dodira sa zrakom. Izbor zaštitnog plina ovisi o: vrsti osnovnog materijala, obliku prijenosa dodatnog materijala, brzine zavarivanje, dubini penetracije, cijeni zaštitnog plina, raspoloživosti opreme, itd. Zaštitni plin kod ovih postupka bitno određuje kvalitetu zavara. U počecima uvođenja postupka zavarivanja u atmosferi zaštitnog plina uobičajeno je bilo svega nekoliko pojedinačnih plinova, na primjer kod zavarivanja MIG postupkom čisti argon, a kod zavarivanja MAG postupkom čisti ugljikov dioksid.

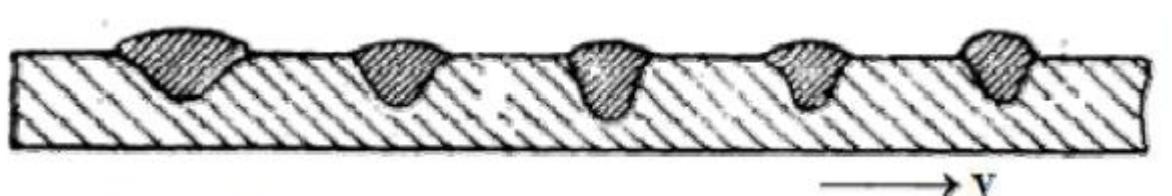
Danas prevladavaju mješavine plinova. U tablici 1. su prikazani plinovi koji se koriste za MIG/MAG zavarivanje. [6]

Tablica 1. Plinovi koji se koriste kod MIG/MAG zavarivanja [9]

Plinovi i mješavine	Primjena
Ar	Svi metali
He	Svi metali
Ar + He (35-75 %)	Svi metali, posebno Al, Cu i Ni
Ar + O ₂ (0,5 %)	Al i Al-legure
Ar + O ₂ (1-2 %)	Visokolegirani CrNi čelici
Ar + O ₂ (3-5 %)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + H ₂ (5-10 %)	Visokolegirani CrNi čelici
	Za zavarivanje automatom
Ar + N ₂ (25-30 %)	Bakar i legure bakra
Ar + CO ₂ (20-50 %)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ + O ₂ (79 + 15 + 6 %)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ + O ₂ (78 + 20 + 2 %)	Nelegirani i niskolegirani čelici
CO ₂	Nelegirani i niskolegirani čelici
N ₂	Bakar i njegove legure

2.1.4. Brzina zavarivanja

Pod brzinom zavarivanja se podrazumijeva brzina kojom se električni luk pomiče duž linije zavora. Općenito, brzina zavarivanja je određena jačinom struje i položajem zavarivanja. Povećanjem brzine zavarivanja smanjuje se širina i visina zavora te dubina penetracije. Brzina zavarivanja utječe i na izgled te mehanička svojstva zavora. [6]



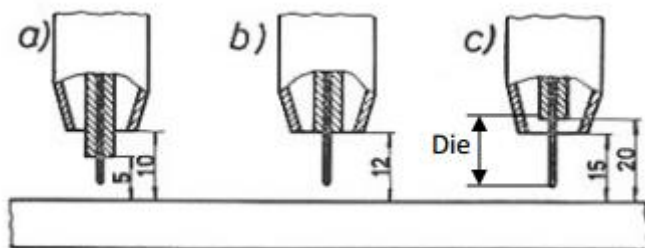
Slika 5. Utjecaj brzine zavarivanja na oblik zavora [7]

2.1.5. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice ili dužina izvučenog dijela elektrode računa se od kraja vodilice do vrha elektrodne žice. Samo taj dio elektrodne žice je u strujnom krugu. O tome kolika je dužina izvučenog dijela žice ovisi i struja zavarivanja jer duži izvučeni dio znači i veći otpor što znači i slabiju struju zavarivanja. [7]

Primjera radi, zadovoljavajuća dužina izvučenog dijela žice: [7]

- za prijenos u kratkom spoju od 6 do 13 mm
- za ostale oblike prijenosa od 13 do 20 (25) mm.



Slika 6. Slobodni kraj žice [7]

2.1.6. Induktivitet

Induktivitet je parametar kojim opisujemo brzinu porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda nakon ostvarivanja kratkog spoja. Induktivitet je istodobno i svojstvo svakog vodiča da inducira elektromagnetno polje kada struja kroz njega proteče. Ako kroz vodič protječe konstantna struja, elektromagnetno polje je nepromjenjivo. Ali ako se jakost struje mijenja, proporcionalno se također inducira napon koji se protivi smjeru gibanja struje. Induktivitet je jedan od glavnih parametara koji se mogu podesiti na izvoru struje kod postupka MAG zavarivanja. Koristi se samo kod zavarivanja kratkim spojevima, kod drugih nema utjecaja jer je jakost struje približno konstantna. Razlog zbog kojega se koristi je krajnje i fino podešavanje parametara kojima se želi postići efikasniji prijenos materijala u električnom luku. Također o tome direktno ovisi i fizički izgleda zavora.

Prilagodbu vršimo prema debljini radnog komada, vrsti materijala, položaju zavarivanja (horizontalno, vertikalno, nadglavno) te vrsti sloja zavarivanja kojeg zavarivač popunjava - korijenski, popunski ili završni prolaz bitno se razlikuju. [10]

Neke od prednosti zavarivanja MAG postupkom su: [5]

- primjenjivost za zavarivanje svih vrsta materijala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- mogućnost zavarivanja u otvorenim i zatvorenim prostorima
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- velik izbor parametara i načina prijenosa materijala
- visoka učinkovitost i proizvodnost
- širok raspon debljina osnovnog materijala
- pogodnost za automatizaciju (automatska regulacija visine električnog luka).

Neke od nedostataka zavarivanja MAG postupkom su: [5]

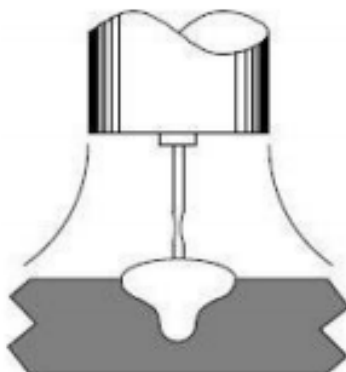
- kod rada na terenu moguće greške (vjetar može otpuhivati zaštitni plin)
- mogući problemi kod dovoda žice (pogotovo ako je duljina polikabela veća od 3 m)
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba naknadne obrade zavarenog spoja)
- složeni uređaji (automatsko dovodenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje).

2.2. Vrste prijenosa metala u električnom luku

Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavora. Odabirom parametara zavarivanja moguće je definirati odgovarajući prijenos metala koji predstavlja optimalan odabir. Iz tog razloga prijenos metala kod MAG zavarivanja ima veliku ulogu. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja [11]. Kod elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom rastaljeni se metal s elektrodne žice prenosi u obliku kapljica koje se mogu prenositi slobodnim letom ili premošćivanjem. Prijenos metala premošćivanjem obuhvaća prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom, dok se kod prijenosa metala slobodnim letom kapljice mogu prenositi štrcajućim ili impulsnim lukom. Prijenos metala kratkim spojevima, mješovitim i štrcajućim lukom spadaju u prirodne prijenose, dok impulsni prijenos kapljica spada u kontrolirani prijenos metala. [12]

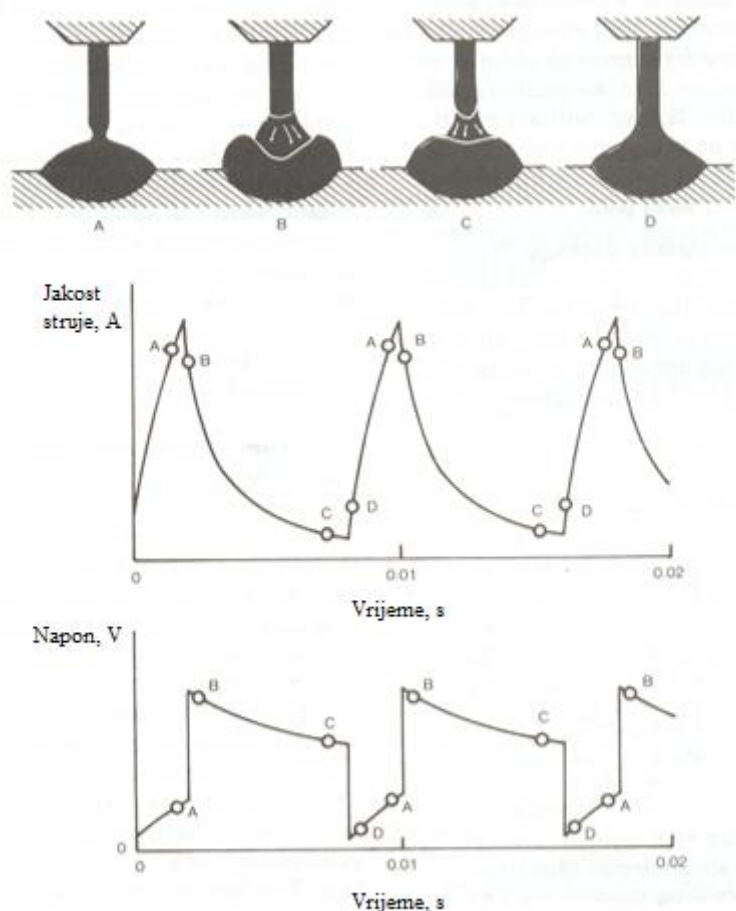
2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Kod prijenosa materijala kratkim spojevima (engl. Short Arc, oznaka MAGk) kontinuirano dobavljana žica tali se pomoću električnih kratkih spojeva koji se ponavljaju u ciklusima. Karakteristike ovog prijenosa metala su mali unos topline te činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri fizičkom kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline. Koriste se male struje zavarivanja (od 50 A do 170 A), niski naponi (od 13 V do 21 V) te zaštitni plin CO₂ ili mješavine (CO₂ + Ar, CO₂ + Ar + O₂). [11]



Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojem [12]

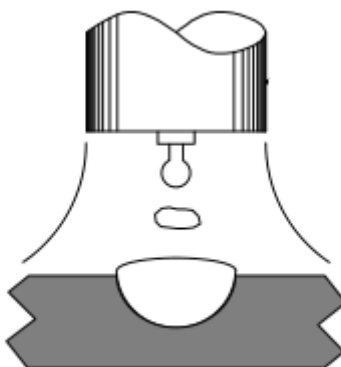
Period u kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na dvije faze: fazu kratkog spajanja i fazu električnog luka. U prvoj fazi dolazi do odvajanja kapljice u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje. To dovodi do povećanja magnetske sile koja stišće kapljicu taline i vrška žice, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja [11]. Na slici su prikazani dijagrami koji prate napon i jakost struje u 4 točke odvajanja jedne kapljice metala.



Slika 8. Prikaz odvajanja jedne kapljice metala s pratećim dijagramima [13]

2.2.2. *Prijenos metala prijelaznim lukom*

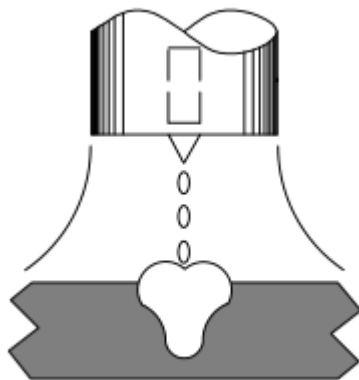
Prijenos metala prijelaznim lukom (engl. mixed arc, oznaka MAGi) je kombinacija prijenosa slobodnim letom kapljica (štrcajućeg luka) i u manjoj mjeri kratkim spojevima. Proces započinje stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice koja se uslijed djelovanja sila odvaja u električnom luku i pada u talinu bez kratkog spoja. Kako bi se izbjegle neke od grešaka kao što su teška kontrola, neregularnost procesa, rasprskavanje, lošije protaljivanje, što može uzrokovati nepotpuno spajanje materijala i nastajanje pukotina koriste se veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i veći naponi (od 22 V do 25 V). Razlog tome je što bi kapljica mogla toliko narasti i u određenom trenutku dodirnuti talinu, što dovodi do rasprskavanja i nestabilnosti procesa. Svi ti nedostaci, kod prijenosa metala prijelaznim lukom, rezultiraju da se ovakav postupak izbjegne ili minimizira u praksi. [11]



Slika 9. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [12]

2.2.3. *Prijenos metala štrcajućim lukom*

Karakteristika prijenosa metala štrcajućim lukom (engl. spray arc, oznaka MAGs) jest prijenos puno malih kapljica slobodnim letom kroz atmosferu luka od elektrode prema radnom komadu. Ovim postupkom niti u jednom trenutku održavanja luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom. Djelovanjem sila na električni luk otkidaju se kapi i usmjeravaju prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Kod ovog prijenosa koristi se visok napon (od 24 V do 40 V) te visoka struja (od 200 A do 600 A) kako bi u jednoj sekundi broj kapljica metala narastao i na nekoliko stotina. Prednosti ovog prijenosa su velika penetracija, mogućnost korištenja većih promjera žice što rezultira smanjenjem rasprskavanja te daje lijep izgled zavaru. Dok su nedostaci opasnost od slijevanja velike količine rastaljenog materijala uslijed djelovanja gravitacijske sile, uz to nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima te postoji opasnost od protaljivanja kod tanjih materijala. [11]



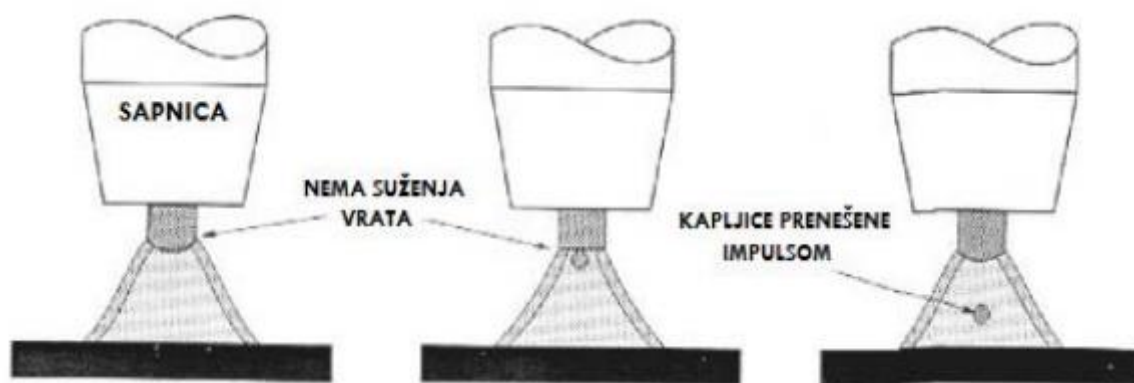
Slika 10. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [12]

2.2.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom (engl. pulsed arc, oznaka MAGp) je kontrolirani način prijenosa metala slobodnim letom kapljica (vrlo sličan prijenosu metala štrcajućim lukom) s razlikom da, kod impulsnog zavarivanja, izvor struje generira promjenjiv oblik struje, tzv. impuls što omogućuje otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa što omogućava kontrolu količine prijenosa materijala promjerom žice i brojem impulsa (koristi frekvenciju od 20 do 300 Hz). Impulsni prijenos metala osigurava stabilan i miran električni luk bez rasprskavanja, prijenos se odvija bez kratkih spojeva, na sam prijenos utječu elektromagnetska sila i sila površinske napetosti. [11]

Kod korištenja ovog prijenosa važno je podesiti i uskladiti 5 osnovnih parametara zavarivanja koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk kod impulsnog zavarivanja: [12]

- jakost vršne struje (od 250 A do 650 A)
- osnovna struja, koja omogućava gašenje luka nakon prestanka impulsa (od 20 A do 50 A)
- širina impulsa (od 1 ms do 3 ms)
- frekvencija impulsa (određuje broj kapljica u sekundi)
- brzina dodavanja žice.



Slika 11. Shematski prikaz prijenosa metala impulsnim lukom [14]

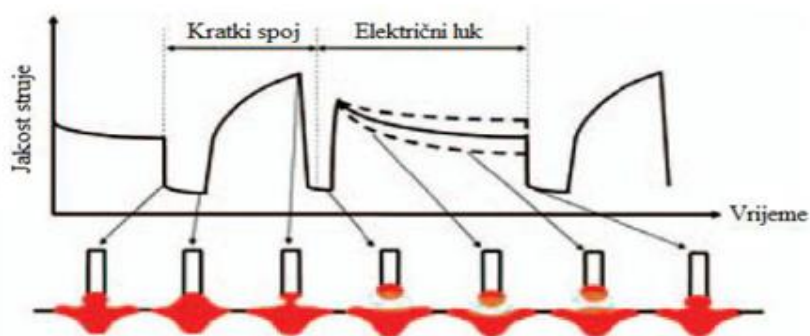
Zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala primjenjivo je u svim položajima i za sve materijale osjetljive na količinu unosa topline, kao i primjena u cjelokupnom rasponu od visokih do niskih struja zavarivanja. [12]

3. MAG CBT (engl. Controlled Bridge Transfer)

Danas se velika pozornost posvećuje postupcima zavarivanja koji rezultiraju sa što manjom količinom rasprskavanja kako bi se smanjila količina industrijskog otpada i dodatni troškovi naknadne obrade i ostalih postupaka potrebnih za uklanjanje posljedica rasprskavanja. Do sada se kao najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu male količine rasprskavanja, koristilo impulsno MIG/MAG zavarivanje. Međutim, impulsno zavarivanje zbog relativno velikog pritiska plazme luka i konstantnog održavanja električnog luka u području niskih parametara nije povoljno za zavarivanje korijenskog prolaza. Tako postupkom konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja u području prijenosa metala kratkim spojevima dolazi do veće količine rasprskavanja i to u trenutku ponovne uspostave električnog luka odmah nakon prekida kratkog spoja.

Sve to je navelo proizvođače da modificiraju postupak koji će u području kratkih spojeva i prijelaznog luka minimalizirati rasprskavanje. Uz to takvim postupkom se proširuje i radno područje za primjenu čistog ugljičnog dioksida, a sve to rezultira smanjenjem i trošak zaštitnog plina. [15]

Controlled Bridge Transfer (CBT) je prijenos metala gdje dolazi do smanjene pojave rasprskavanja kada na rastaljeni metal djeluje sila „pinch“ efekta. Tada se precizno određuje iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave električnog luka. U skladu s padom napona u istom trenutku dolazi i do pada vrijednosti jakosti struje, kako je prikazano na slici 12., te se kao rezultat toga, prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice vrši isključivo pomoću površinske napetosti. [15]



Slika 12. Princip CBT MAG postupka zavarivanja [15]

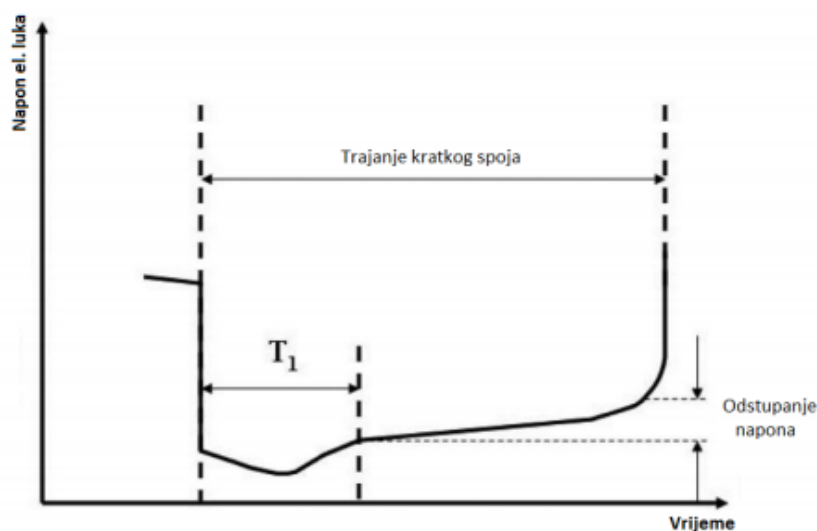
Odvajanje kapljice može zbog utjecaja različitih čimbenika varirati, kao što su: [11]

- duljina slobodnog kraja žice
- brzina zavarivanja
- položaj zavarivanja
- veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala
- ponašanje taline.

Kako bi se izbjegao utjecaj navedenih čimbenika, jakost struje zavarivanja podešava se optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka.

Na taj način moguće je upravljati prijenosom metala za vrijeme kratkog spoja i stabilizirati električni luk. Pomoću opisanog načina prijenosa metala moguće je precizno nadziranje procesa odvajanja rastaljene kapljice metala u svrhu predviđanja trenutka pojave kratkog spoja, odnosno ponovne uspostave električnog luka čime se minimizira pojava rasprskavanja. Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili u potpunosti eliminacijom prskanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline omogućuje se zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljine manje od promjera dodatnog materijala, što uvelike utječe na troškove izrade konstrukcije. [16]

Proces predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja prikazan je na slici 13. Jasno je vidljivo da nakon pojave kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti s padom jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava rasprskavanja. T_I označuje područje u kojem napon još nije počeo rasti te se taj napon u tom području smatra referentnim naponom. Daljnje odstupanje od referentnog napona učestalo se mjeri, u trenutku kada odstupanje dosegne definiranu graničnu vrijednost dolazi do ponovnog uspostavljanja električnog luka. [16]



Slika 13. Predviđanje trenutka ponovne uspostave električnog luka ovisno o naponu [16]

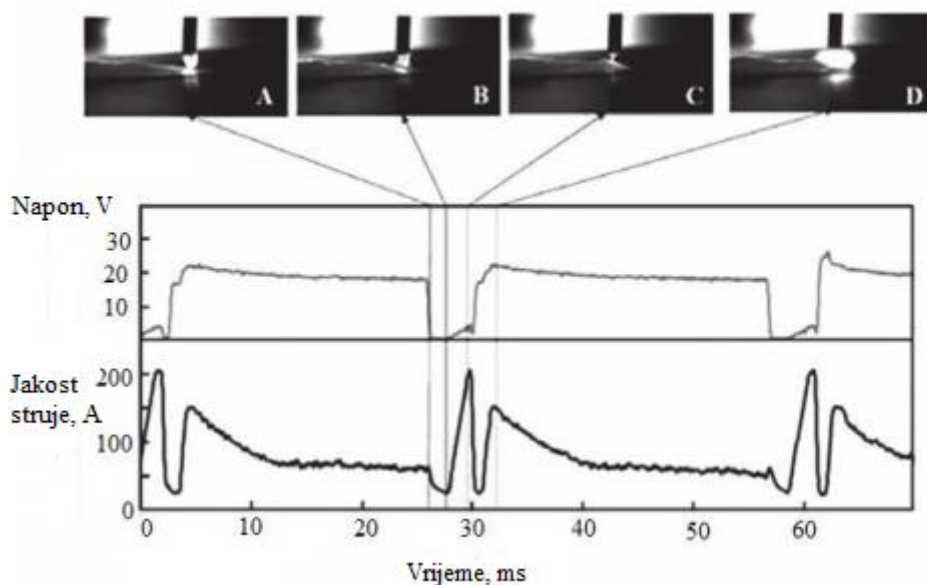
Kod MAG postupaka zavarivanja sa zaštitnim plinom 80 % Ar + 20 % CO₂ optimalno odstupanje napona je u rasponu od 1,2 V do 2,0 V. Preciznim predviđanjem uspostave električnog luka i smanjivanjem struje neposredno prije uspostave električnog luka, rastaljena kapljica se prenosi u talinu zavara samo pomoću sila površinske napetosti i rasprskavanje se uspijeva kontrolirati. [16]

Na slici 14 dan je prikaz prijenosa rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni materijal pri CBT načinu prijenosa metala pomoću visokobrzinske kamere u korelaciji s promjenom struje i napona. Parametri korišteni u navedenom procesu prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju [11]

Zaštitni plin	80 % Ar + 20% CO₂
Jakost struje, A	80
Napon, V	16,2
Promjer žice, mm	1
Brzina zavarivanja, cm/min	50

Na slici 14 su četiri kadra snimljena visokobrzinskom kamerom. Kadar A prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkog spoja, u kadrovima B i C vidi se prijenos rastaljene kapljice prema talini zavora, te njen stisnuti oblik na vrhu kapljice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne uspostave električnog luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk, što prikazuje kadar D, ne dolazi do pojave prskanja. [11]




Slika 14. Faze CBT prijenosa metala snimljene visokobrzinskom kamerom [17]

3.1. Izvori struje kod CBT MAG zavarivanja

Danas se uglavnom koriste inverterski ispravljači kao izvor struje za CBT postupak zavarivanja. Glavne prednosti invertera su njihova efikasnost koja je znatno veća u odnosu na konvencionalne transformatore radi smanjenih gubitaka struje u željeznoj jezgri transformatora. Uz to inverteri su znatno manje mase te time pogodniji za upotrebu i transport. Prvi inverteri pojavili su se 1996. godine. To je bila prva generacija inverterskih ispravljača, tada su koristili 16-bitni procesor s vremenom obrade podataka od 100 μ s. Zatim se razvila druga generacija invertera između 2001. i 2007. godine, tu se koristio 32-bitni procesor s vremenom obrade podataka od 25 μ s i snagom koja je bila četiri puta veća od prve generacije invertera. Slijedila je pojava treće generacije, 2008. godine.

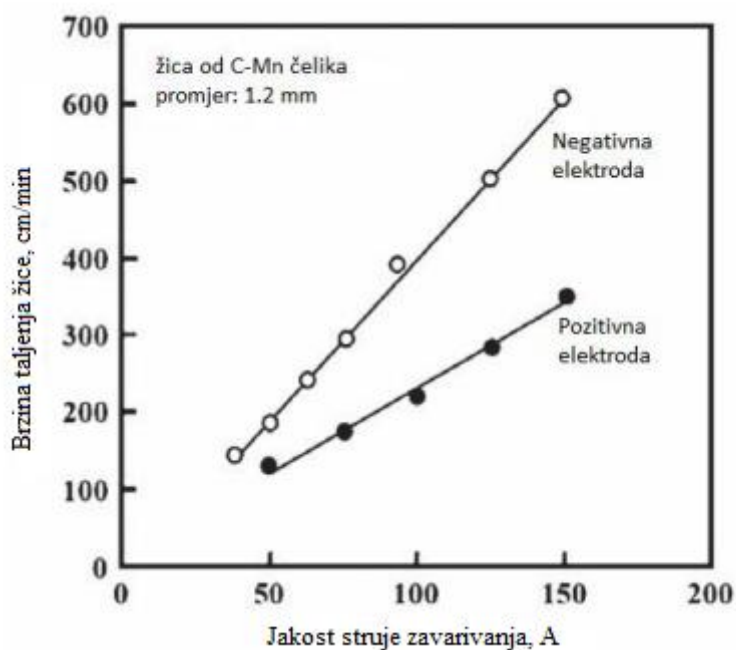
Karakteristika ove generacije je brzina obrade podataka manja od 1 μ s. Cjelokupan tehnološki razvoj utjecao je na pojavu četvrte generacije, tzv. visokobrzinskih Welbee mikroprocesora koji su se razvili 2010. godine, a karakterizira ih brzina obrade koje je oko 20 ns i snaga procesora koja je povećana 64 puta u odnosu na prvu generaciju. Četvrta generacija omogućila je veliku brzinu obrade podataka i visoku preciznost kontrole dinamičke karakteristike jakosti struje i napona izvora struje. [18]

Tablica 3. Klasifikacija digitalnih invertera [18]

	Prva generacija 1996-2000	Druga generacija 2001-	Treća generacija 2008-	Četvrta generacija 2010-
Uređaj za zavarivanje				
Procesor	16-bit CPU	32-bit CPU	FPGA	ASIC
Vrijeme obrade podataka	100 μ s	25 μ s	1 μ s	20 ns
Kapacitet procesora	1	4	16	64

3.2. CBT – EN (engl. Electrode negative) postupak

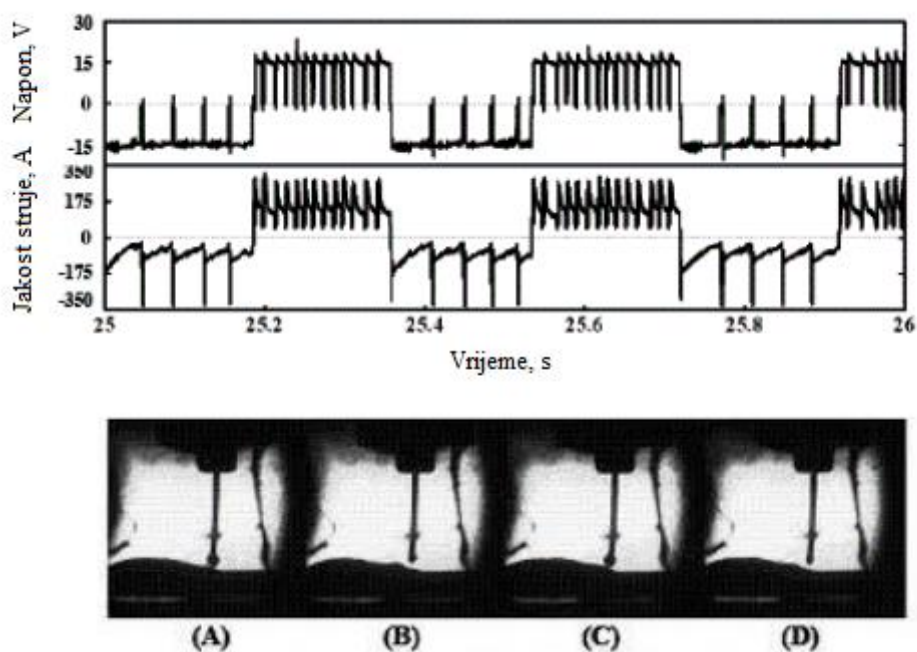
Kada se CBT način prijenosa metala koristi kod zavarivanja sa žicom spojenom na negativni pol to zovemo CBT – EN postupak. Takav postupak omogućuje mali unos topline i smanjeno rasprskavanje. Brzina taljenja žice pri navedenom postupku je veća jer je količina topline u žici veća od one u osnovnom materijalu. Na slici 15. se može vidjeti usporedba brzine taljenja žice promjera 1,2 mm spojene na pozitivan pol te iste žice spojene na negativan pol u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂. Zaključak je da CBT – EN postupak omogućuje manji unos topline pri jednakoj količini rastaljenog metala u odnosu na postupak zavarivanja s elektrodom spojenom na pozitivan pol. [17]



Slika 15. Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i negativnom polu [17]

3.3. CBT – AC (engl. Alternative Current) postupak

CBT - AC je postupak kod kojeg se koristi izmjenična struja s malom frekvencijom izmjene pozitivnog i negativnog pola. Frekvencijom i omjerom pozitivnog i negativnog pola mjeri se vrijeme trajanja pozitivnog i negativnog pola. Brzina taljenja žice za vrijeme negativnog polariteta je za 1,5 puta veća od one za vrijeme pozitivnog polariteta. To se postiže pomoću novo razvijenih uređaja i mikroprocesora kojima se postiže precizna kontrola karakteristike električnog luka, tj. jakosti struje i napona, za vrijeme trajanja oba polariteta. Prijenos rastaljene kapljice prikazuje slika 16. gdje je vidljiva korelacija prijenosa rastaljene kapljice s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. [19]



Slika 16. Prijenos metala kod CBT - AC postupka u realnom vremenu [19]

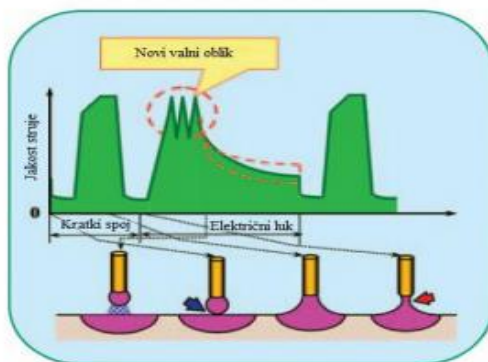
Kadar A na slici 16. prikazuje trenutak prijenosa metala u vrijeme mjerenja koji je ekvivalentan trenutku mjerenja jakosti struje i napona od 25 sekundi. U tom trenutku električni luk je u drugoj polovici pri negativnim polaritetom. Kadar B prikazuje rastaljenu kapljicu u trenutku ponovnog uspostavljanja električnog luka nakon prolaska kratkog spoja.

Kadar C prikazuje trenutak od 25,2 sekunde neposredno prije prelaska polariteta iz negativnog u pozitivan. Vidljivo je da rastaljena kapljica ima gotovo identičan oblik i veličinu kao u kadru A. Na kadru C se vidi da je rasprskavanje spriječeno i kod ponovne uspostave električnog luka neposredno nakon promjene polariteta. [12]

Prednost CBT – AC postupka je smanjivanje penetracije s povećanjem omjera negativnog polariteta. Kao rezultat toga, uz preciznu kontrolu unosa topline u osnovni materijal ostvareno je i jednostavno kontroliranje oblika zavara. Isto tako se smanjila pojava rasprskavanja do 6 puta s obzirom na klasični AC – MAG. [19]

3.4. CBT – EX (engl. Expanded) postupak

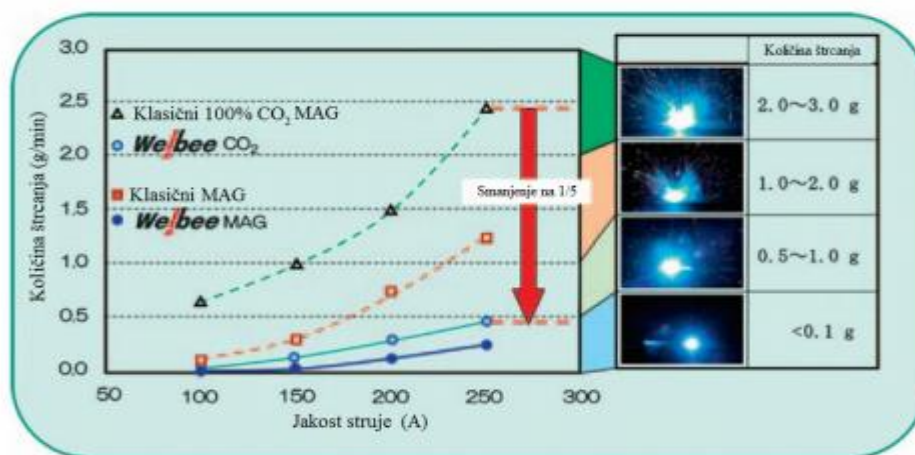
Klasičnim CBT načinom prijenosa metala pojava rasprskavanja se smanjuje u rasponu parametara koji odgovaraju prijenosu metala kratkim spojevima. Kako bi povećali proizvodnost procesa i brzinu zavarivanja potrebno je doći do krupnokapljicastog (globularnog) prijenosa metala, što znači da se moraju povisiti iznosi parametara. Mijenjanjem parametara više se ne može koristiti konvencionalno CBT MAG zavarivanje, već je potrebna nadogradnja. Razvija se CBT – EX MAG postupak zavarivanja. Smanjenje pojave rasprskavanja prije ponovne uspostave električnog luka slična je kao i u slučaju CBT MIG/MAG postupka zavarivanja. No, da bi se pri krupnokapljicastom prijenosu predvidjela ponovna uspostava električnog luka, razvijen je novi visokoprecizni i visokobrzinski Welbee mikroprocesor [18]. Slika 17. prikazuje princip rada CBT – EX MAG postupka zavarivanja.



Slika 17. Princip rada CBT – EX MAG postupka zavarivanja [18]

Na slici 17. je vidljivo da trenutak prije uspostave električnog luka, struja kratkog spoja naglo pada što uzrokuje i smanjenje učinka taljenja dodatnog materijala. Razlog tome je povećanje brzine dodavanja žice kod krupnokapljicastog prijenosa metala u odnosu na prijenos metala kratkim spojevima. Kako bi se nadoknadio gubitak energije u trenutku uspostave električnog luka jakost struje se naglo povećava. Novorazvijeni valni oblik struje ima za posljedicu još veće smanjenje napona pri zavarivanju što omogućava manji unos topline i veće brzine zavarivanja. [11]

Valni oblik struje prikazan na slici 17. primijenjen je kako bi se smanjilo negativno djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu na kraju elektrode. Promjena je vidljiva u trokutastom profilu valnog oblika struje koji se nadodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka. Na taj način se postiže stabilan prijenos metala, regulacija trajanja električnog luka i optimalan omjer pojave kratkog spoja/električnog luka pri parametrima koji inače karakteriziraju krupnokapljicasti prijenos metala. [11]



Slika 18. Usporedni rezultati pojave rasprskavanja pri CBT – EX MAG i konvencionalnom MAG zavarivanju [18]

Slika 18. prikazuje usporedne rezultate pojave rasprskavanja pri konvencionalnom MAG i CBT – EX MAG zavarivanju. Najveća razlika u količini rasprskavanja primijećena je kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO₂. U navedenom slučaju je pri CBT – EX MAG zavarivanju postignuto smanjenje prskanja na 20 % od ukupne količine prskanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja (2,5 g/min). [11]

4. WAAM (engl. Wire and Arc Additive Manufacturing)

4.1. Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing – AM)

Sve veći zahtjevi tržišta kao što su povećanje kvalitete proizvoda, fleksibilnost pri razvoju i proizvodnji, sniženje troškova, skraćanje vremena izrade, personalizirana proizvodnja, izrada komponenata složene geometrije i sl. dovode do razvitka i primjene postupaka aditivne proizvodnje. Glavna karakteristika tih postupaka aditivne proizvodnje je dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade komponente blizu konačne dimenzije (engl. near net shape) ili do konačne dimenzije (engl. net shape). Takav način omogućuje izradu komponenti vrlo složene geometrije koju bi klasičnim postupcima izrade bilo vrlo teško ili nemoguće izraditi. [20]

Posebno se ističe aditivna proizvodnja metala koja se sve više primjenjuje i razvija jer je sposobna odgovoriti visokim zahtjevima tržišta. Aditivna proizvodnja gdje se koristi zavarivanje za izradu komponenti ima mnoge prednosti kao što su jeftina oprema, jednostavna kontrola procesa i visoka količina depozita. Sve prisutniji postupak je WAAM (engl. Wire and Arc Additive Manufacturing). Ovaj postupak koristi električni luk kao izvor energije, robota koji omogućuje automatsko gibanje pištolja za zavarivanje, manipulatore, elektrolučne izvore energije (MIG/MAG, TIG, plazma). Provede se mnoga istraživanja i objavljen je veliki broj znanstvenih radova koji opisuju postupak i obrađuju problematiku kod WAAM-a. Zbog toga još nije široko primjenjiv u industriji, ali mogućnosti koje pruža ukazuju da će u određenim granama industrije potisnuti klasične načine izrade. [20]

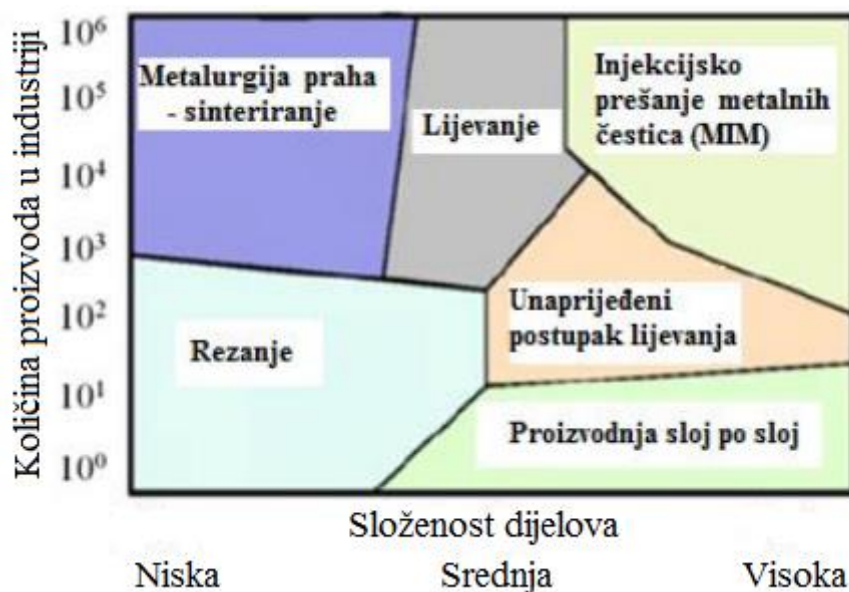
Aditivni postupci u odnosu na klasične procese izrade imaju izvrsne rezultate, posebice pri izradi metalnih dijelova složene geometrije. Pokazali su se vrlo djelotvorni kod izrade lakših dijelova što za posljedicu ima manju potrošnju goriva i manje troškove (automobilska i zrakoplovna industrija). Omogućuju i izradu sklopova iz jednog dijela što je s klasičnim postupkom nemoguće. Aditivna proizvodnja omogućuje izradu dijelova od skupih materijala poput titana, nikla i njihovih legura, te je velika primjena u zrakoplovnoj industriji koja zahtjeva mali BTF (engl. Buy-To-Fly) omjer. Veliki čimbenik aditivne proizvodnje je smanjenje vremena proizvodnje i ljudskog rada radi toga što je aditivna proizvodnja podložna potpunoj automatizaciji zbog razvoja CAD/CAM sustava. [21]

Programom na CNC stroju također je moguće automatski generirati složene dijelove iz CAD modela, ali za taj postupak je potrebno nekoliko prihvata obratka što povećava vrijeme rukovanja. Aditivna proizvodnja ima i neka ograničenja u svojoj primjeni tako je jedno od njih i nedostatak kvalitete površine što kao posljedicu ima utjecaj na dimenzije i kvalitetu proizvedenog dijela [21]. Tablicom su prikazane prednosti i nedostaci aditivnog postupka.

Tablica 4. Prednosti i nedostaci aditivnog postupka s tehnološkog i ekonomskog gledišta [22]

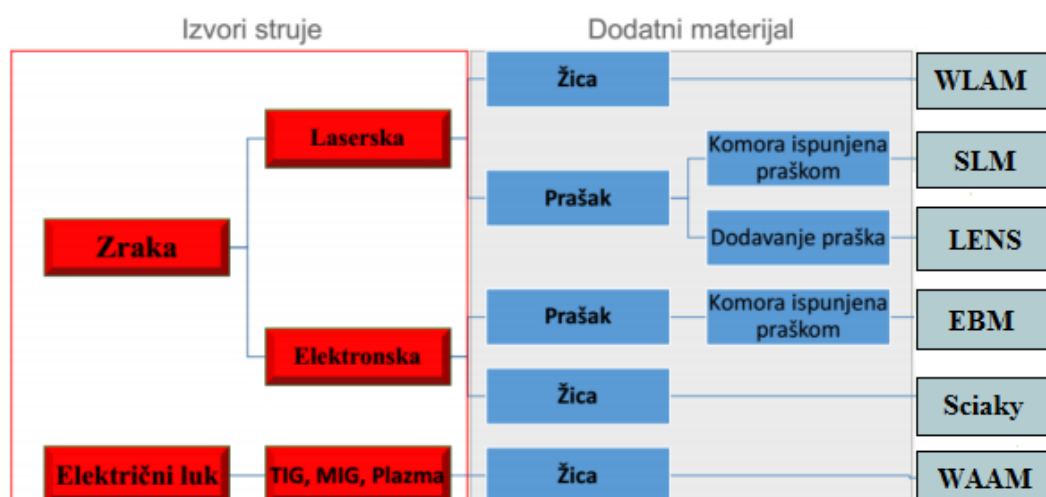
Tehnološke karakteristike	Prednosti	Nedostaci
	Direktna izrada 3D proizvoda bez upotrebe alata ili kalupa	Nemogućnost kombinacije materijala i problem s izradom velikih dijelova
	Promjena dizajna proizvoda ne uzrokuje dodatne troškove proizvodnje	Potrebna naknadna obrada površine
	Izrada dijelova složene geometrije	Mala je brzina izrade
	Velika fleksibilnost proizvodnje: dijelovi se mogu izraditi bilo kojim redom	Potrebno je veliko iskustvo i kvalificirana radna snaga
Ekonomske karakteristike	Manji gubitak materijala	Nedovoljno iskorištene mogućnosti zbog nedostataka u dizajnu alata i smjernicama
	Brzina i jednostavnost izrade novih proizvoda	Visoki troškovi sirovine i energije
	Postizanje veće cijene proizvoda kroz prilagođavanje i funkcionalna poboljšanja	Nepostojanje ekonomije razmjera (smanjenje troškova izrade ne uzrokuje povećanje obujma proizvodnje)
	Kupac nema troškove zbog redizajna proizvoda	Nedostatak kvalitetnih standarda
	Manji troškovi montaže zbog mogućnosti izrade složenih proizvoda iz jednog dijela	Ponuda proizvoda ograničena je tehnološkom izvedivošću (kvaliteta, brzina)
	Manje prepreka prilikom izlaska na tržište	Potrebna je obuka
	Nema povećanja troškova pri izradi različitih proizvoda	Potrebno je radno iskustvo i kvalificirana radna snaga

Danas aditivna proizvodnja metalnih komponenti ima veliku primjenu pri izradi dijelova i prototipova. Početak je bila primjena aditivne proizvodnje u industriji dijelova od polimera, a danas se koristi za izradu gotovih dijelova. Položaj aditivne proizvodnje metalnih materijala u odnosu na ostale tehnologije danas je nezamjenjiva pri izradi dijelova sa srednjom do visoke složenosti geometrije. [21]



Slika 19. Kvalitativno stanje proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na uobičajene postupke [21]

Ovaj način proizvodnje zadovoljava sve visoke zahtjeve zrakoplovne industrije, automobilske industrije, te brzih izrada alata. Tako kod aditivne proizvodnje postoji više izvora energije: laserska zraka, elektronski mlaz i električni luk, a kao dodatni materijal koristi se prašak ili žica. [23]



Slika 20. Podjela postupaka aditivne proizvodnje za metale [23]

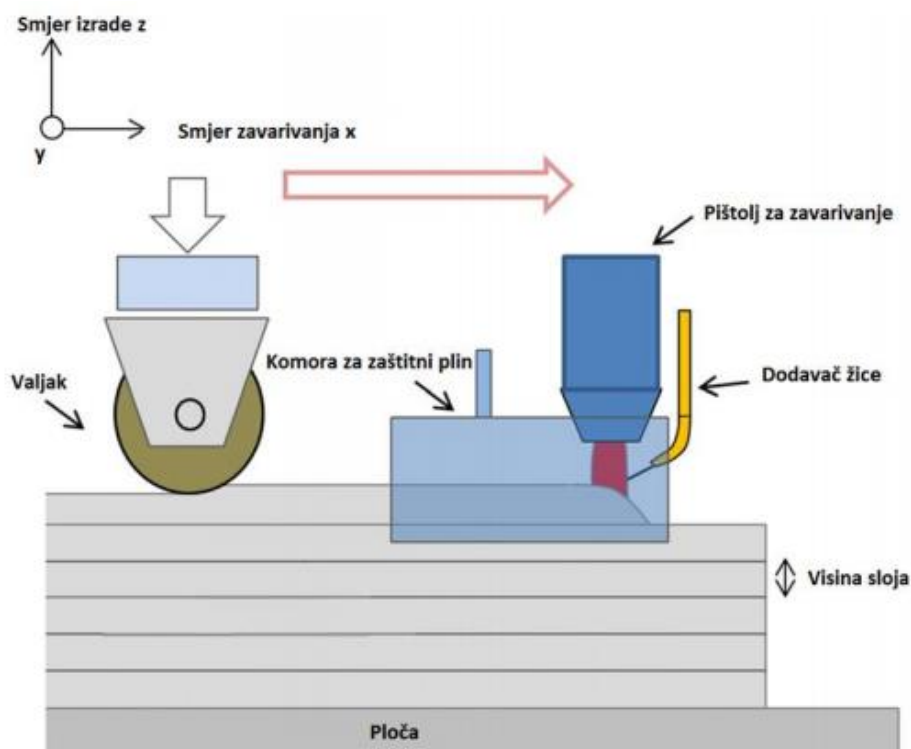
4.2. Općenito o WAAM (engl. Wire and Arc Additive Manufacturing) postupku

WAAM je postupak proizvodnje žicom i električnim lukom. Kapljice metala se talože u slojevima i tako nastaje ravan zid širine od 1 do 20 mm, a količina nataloženog materijala kreće se od 50 do 130 g/min. Ravni metalni zid uključuje i valovitost koja nastaje tijekom zavarivanja, a koju je potrebno ukloniti naknadnim procesima obrade radi eliminacije površinske nepravilnosti. Važno je razlikovati pojmove efektivna širina zida i ukupna širina zida kao što je prikazano na slici 21. [24]



Slika 21. Zid izrađen WAAM postupkom [24]

Oprema koja se koristi kod WAAM sustava zavarivanja je izvor struje, pištolj za zavarivanje, robot ili CNC portalni stroj, kontrolna jedinica koja upravlja robotom i uređaj za dodavanje žice, te dodatni elementi kao što su zaštitni šator ili komora i valjak za valjanje slojeva. Izvor struje osigurava električni luk koji tali žicu, tako da se tim postupkom primjenjuju različiti elektrolučni postupci zavarivanja kao što su MIG/MAG, TIG i plazma zavarivanje. [24]



Slika 22. Osnovna i dodatna oprema za WAAM postupak [25]

4.3. Problemi koji nastaju kod WAAM postupka zavarivanja

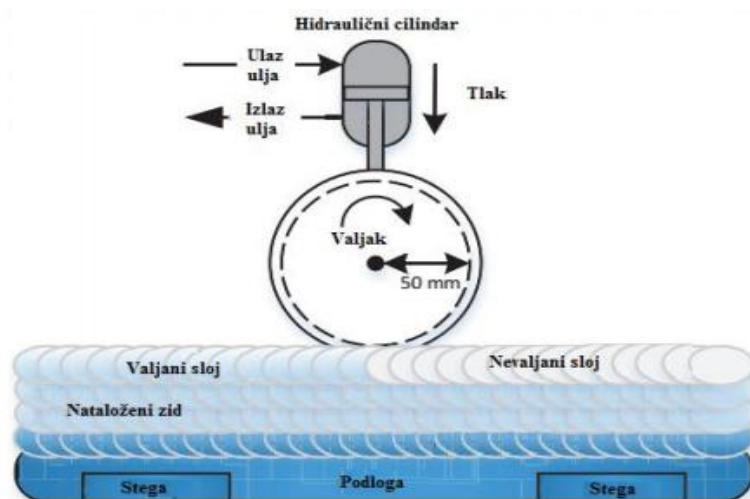
Problemi koji nastaju WAAM postupkom radi visokog unosa topline su: [24]

- zaostala naprezanja koja rezultiraju lošim mehaničkim svojstvima
- deformacije koje rezultiraju teškoćama prilikom postizanja zahtjevnih tolerancija.

Postupci koji se koriste u izradi dijelova WAAM postupkom: [24]

- radnje prije taloženja-optimiranje parametara, učvršćivanje podloge i optimizacija taloženja metala sloj po sloj
- radnje za vrijeme taloženja-najviše utječu na smanjenje deformacija i naprezanja, to su: optimizacija vremena hlađenja, ostvarivanje taloženja materijala s obje strane podloge radi dobivanja jednake geometrije i uklanjanje zaostalih naprezanja koje se postiže valjanjem
- radnje nakon taloženja-klasični postupci toplinske obrade.

Valjanjem se postiže smanjenje zaostalih naprezanja, smanjenje valovitosti te ujednačenost nanesenog sloja te dobivanje povoljnije mikrostrukture (odnosno smanjenje veličine zrna) [24]. Shematski prikaz valjanja prikazan je na slici 23.



Slika 23. Shematski prikaz valjanja [24]

Prednosti WAAM postupka: [23]

- mogućnost izrade komponenti od skupih materijala kao što su nikal, titan i njihove legure (primjena u zrakoplovnoj industriji)
- automatizacija proizvodnog procesa koja rezultira smanjenim vremenom proizvodnje i ljudskog rada
- upotreba kod proizvodnje komponenata sa složenom geometrijom
- smanjenje gubitaka materijala
- velika količina depozita
- niži troškovi proizvodnje
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa
- nema ograničenja u veličini, mogućnost stvaranja funkcionalno profiliranog materijala
- mogućnost primjene bilo kojeg proizvođača izvora struje i manipulatora.

Nedostaci WAAM postupka: [23]

- pojava zaostalih naprezanja i deformacija radi visokog unosa topline
- pojava poroznosti
- neujednačena geometrija zavara (vidljivo kod velikih podloga jer se unos topline razlikuje na početku i završetku zavarivanja)
- potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica.

4.4. Materijali kod WAAM-a

Kako bi WAAM postupak zavarivanja postigao očekivana mehanička svojstva te kako bi se spriječile pojave grešaka (poroznost) najčešće se primjenjuju titan, aluminij, čelik, bronca, bakar i nikal. WAAM postupkom moguće je i kombiniranje različitih materijala ako se međusobno kemijski podudaraju [26]. U tablici su prikazani materijali koji se najčešće primjenjuju kod WAAM postupka.

Tablica 5. Najčešći materijali kod WAAM-a [20]

Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	2024, 2319, 4043, 5087
Vatrootporni materijali	Volfram, molibden, tantal
Čelik	ER60, ER80, ER90, ER120, maraging (250 i 350), nehrđajući (17-4 PH, 316L)
Inconel	625, 718
Bronca	-
Bakar	-

4.4.1. Titan

Titan (Ti) i najčešće primjenjivana titanova legura Ti6Al4V spadaju u α - β leguru. Ovu leguru karakteriziraju različite vrijednosti vlačne čvrstoće i produljenja u različitim smjerovima, zatim izdužena zrna i vrlo dobra tekstura što rezultira visokom čvrstoćom u smjeru paralelnom na slojeve. Koristi se kod izrade dijelova trupa i motora aviona aditivnim postupkom, u kemijskoj industriji, za implantante i proteze u medicinskoj industriji te pri izradi turbina [26]. Tablica 6. prikazuje kemijski sastav titanove Ti6Al4V legure, a tablica 7. mehanička svojstva iste.

Tablica 6. Kemijski sastav titanove Ti6Al4V legure [27]

Element	Al	V	Ti	O	Fe
Max. udio elementa, %	6	4	90	0,2	0,25

Tablica 7. Mehanička svojstva titanove Ti6Al4V legure [27]

Vlačna čvrstoća R_m	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$	Istezljivost A_5	Tvrdoća po Brinellu HB
275-350 N/mm ²	125 N/mm ²	15%	75

Pri zavarivanju titana i titanovih legura potrebno je poduzeti mjere zaštite i uvesti modifikacije kako bi se postupak izveo bez pogrešaka i sa zadovoljavajućim mehaničkim svojstvima. Za zavarivanje se ne koristi CMT proces zbog lutanja luka, nego se koriste plazma ili TIG izvori. Kod zavarivanja titana i njegovih legura dolazi do anizotropije faze, koja rezultira smanjenjem vijeka trajanja i lošijih mehaničkih svojstva. Kako bi se to izbjeglo moguće je promijeniti skrućivanje taline promjenom parametara zavarivanja ili promjenom legure. Primjena bilo koja od ta dva rješenja kod WAAM postupka nije primjenjiv zato što je potrebno dobiti dio sa zadanim tolerancijama i nije dopušteno stvaranje krhke faze TiB. Kod WAAM-a je to riješeno uvođenjem dodatne deformacije u tijeku izrade odmah nakon svakog prolaska pištolja za zavarivanje kako bi se dobila potrebna svojstva i smanjila zaostala naprezanja u materijalu. U sistem je integriran valjak kako bi se svaki novi sloj mogao deformirati, ovakav pristup limitira izradu na relativno jednostavne konstrukcije, ali rješava problem anizotropije faze. [25]

Kod zavarivanja titana i njegovih legura nužno je korištenje komore za zavarivanje za temperature iznad 427°C da bi se izbjegla oksidacija, zato titan nije moguće navarivati u okolišnoj atmosferi, nego je potrebna inertna atmosfera od 100% argona. Koristi se standardna komora ili šator za postizanje inertne atmosfere. Specifičnost valjka za mehaničko deformiranje svakog prolaza je dobiveni deformirani prolaz i smanjuje veličina zrna, a time i poboljšanje mehaničkih svojstava. [25]

4.4.2. Aluminij

Aluminij i njegove legure koriste se kada se zahtijevaju svojstva kao što su povoljan omjer čvrstoće i gustoće, dobra toplinska vodljivost, mala specifična masa i odlična korozijska postojanost što su ujedno i karakteristike aluminija i njegovih legura. Legiranjem i precipitacijskim očvrnućem aluminija mogu se proizvesti legure koje imaju čvrstoću većine čelika. Glavni legirni elementi za postizanje veće čvrstoće i tvrdoće su bakar, magnezij, silicij, mangan, krom i cink. Legiranje ima i negativan učinak te se tako smanjuje njegova otpornost na koroziju, ali se bitno poboljšavaju njegova mehanička svojstva [27]. U tablici 8. su prikazane legure aluminija prema načinu očvrnuća te su navedene osnovne karakteristike svake serije i njihova primjena.

Tablica 8. Vrste legura aluminija [27]

Legura	Serijski	Tip	Internacionalne oznake	Karakteristike
Toplinski neočvrstive legure	1000	Al	1050A 1070A 1100 1200 1080	Lako se zavaruje, najniža čvrstoća od svih legura aluminija Spremnici u kemijskoj industriji, cjevovodi, folije
			3003 3004 3005 3105	Udio mangana do 1,5%, povišuje čvrstoću, ali ne ruši značajno duktilnost i korozijsku postojanost Kuhinjsko posuđe, radijatori...
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182	Najviša čvrstoća od toplinski neočvrstivih legura, odlična zavarljivost Tankovi za kemikalije, posude pod tlakom
Toplinski očvrstive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219	Sadrži 2% - 10% bakra, optimalna svojstva se postižu žarenjem, visoka čvrstoća Slabija zavarljivost - tople pukotine Vijci, zakovice, dijelovi zrakoplova
	6000	Al-Si-Mg	6005A 6060 6061 6082 6081 6106 6351	Automobilska industrija, cjevovodi, rešetkaste konstrukcije, ekstrudirani proizvodi Mala sklonost toplim pukotinama
	7000	Al-Zn-Mg	7020 7021 7039	Najčvršća toplinski obradiva legura
		Al-Zn-Mg-Cu	7049A 7175 7075 7475 7010 7150 7050	Loša zavarljivost ukoliko je bakar značajnije zastupljen u leguri Zrakoplovna industrija i okviri za bicikle

WAAM je postupak aditivne proizvodnje u kojem se dio dobiva nanošenjem sloja na sloj pomoću žice i električnog luka. Električni luk tali žicu po sredini uzorka gdje dolazi do potpunog miješanja sa prethodnim slojem, talina se tijekom zavarivanja razlijeva i na rubovima slojeva ne dolazi do protaljivanja. Navedena pojava posebno dolazi do izražaja kod zavarivanja aluminija i njegovih legura zato što aluminij odlično provodi toplinu te talina nema dovoljno vremena da na rubovima rastali prethodni sloj, nego na tim mjestima dolazi do naljepljivanja. Također kod WAAM postupka za aluminij i njegove legure treba obratiti pozornost na stvaranje pora i moguće pukotine u materijalu. Kako bi se izbjegli mogući problemi potrebno je dobro skladištenje žice, naknadna toplinska obrada te se slično kao i kod titanovih legura primjenjuje valjanje između slojeva kako bi se dobila povoljnija mikrostruktura, a time i bolja mehanička svojstva. [27]

Preduvjeti za nanošenje aluminija i njegovih legura WAAM postupkom su: [27]

- kvalitetna priprema površine (čišćenje i odmašćivanje)
- izbor pravilnih parametara zavarivanja
- odabir odgovarajuće tehnologije zavarivanja
- čišćenje zavara između prolaza
- optimalna međuprolazna temperatura.

Parametri zavarivanja najviše utječu na izgled i svojstva nanesenih prolaza. Primjerice ako se koristi visoka struja dolazi do prevelikog unosa topline i talina se slijeva te dolazi do prevelikog širenja zida bez uzdizanja u visinu. Ukoliko je struja zavarivanja manja od potrebne dolazi do naljepljivanja između slojeva i dobivena struktura nije zadovoljavajuća. Na isti način i brzina zavarivanja utječe na izgled kao i parametri. Kod prevelike brzine dolazi do naljepljivanja, a mala brzina povećava unos topline te dolazi kao i kod prevelike struje do širenja zavara. [27]

4.5. Primjena WAAM-a

WAAM postupak se koristi u proizvodnji dijelova od raznih vrsta materijala kao što su titan i njegove legure, aluminij i njegove legure, čelik, bakar, nikal i drugi. Primjenjuje se za izradu srednjih do velikih dijelova te dijelova srednje složenosti. U zrakoplovnoj industriji ima velik broj dijelova koji se izrađuju WAAM postupkom iz razloga što dijelovi izrađeni strojnom obradom imaju veliki BTF omjer. BTF omjer se definira kao omjer volumena ili mase početnog sirovca V_i i volumena ili mase konačnog proizvoda V_f što je prikazano jednadžbom: [20]

$$BTF = \frac{V_i}{V_f} \quad (1)$$

BTF omjer ovisi o tome koliko se početnog materijala nalazi u završnoj komponenti. Danas se teži da taj omjer bude što manji, a nasuprot tome dijelovi izrađeni strojnom obradom imaju veliki gubitak materijala. [20]

S druge strane u zrakoplovnoj industriji se koriste komponente složene geometrije koje su izrađene od skupih materijala, kao što su legure titana i nikla. Kako WAAM postupak zadovoljava te uvjete došlo je do upotrebe WAAM postupka kao zamjene za stroju obradu u zrakoplovnoj industriji. [20]

Osim u zrakoplovnoj industriji, WAAM tehnologija ima široku primjenu u automobilske industriji i za brzu izradu alata. U automobilske industriji se aditivna proizvodnja koristi kao uspješni alat u konstrukciji i izradi prototipova zato jer se može skratiti vrijeme razvoja i mogu se smanjiti proizvodni troškovi. [20]

Na sljedećim stranicama je prikaz nekih karakterističnih dijelova izrađenih WAAM postupkom.

Na slici 24. prikazan je rotor koji je izrađen na sveučilištu Wollongong. Napravljeno je 40 prolaza u vertikalnom smjeru te je dobivena debljina rotora od 70 mm. Nakon WAAM postupka provedena je naknadna strojna obrada. [28]



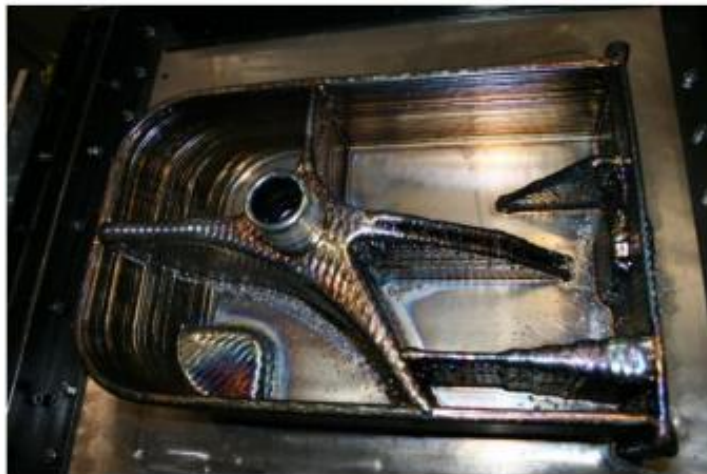
Slika 24. Rotor izrađen WAAM postupkom [28]

Na slici 25. je prikazan model krila za korištenje u zračnom tunelu. Model krila je izrađen od visokočvrstog čelika WAAM sustavom s CMT procesom. [26]



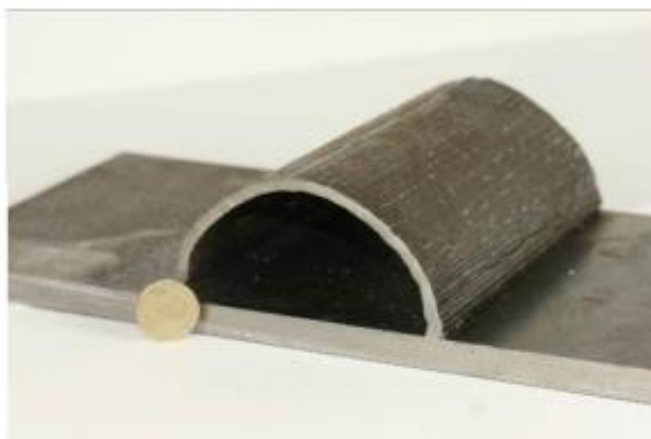
Slika 25. Model krila izrađen WAAM postupkom [26]

Na slici 26. je prikazan primjer izrade dijela velike složenosti. Tvrtka GKN Aerospace je tražila izradu dijela velike složenosti s WAAM postupkom. Ovaj dio sadrži nekoliko značajki koje do tada nisu bile prisutne u izgradnji WAAM postupkom. Dio od legure Ti6Al4V je izrađen simetrično s obje strane podloge. Zbog velike količine depozita, dio je izrađivan s dvije žice istovremeno. [29]



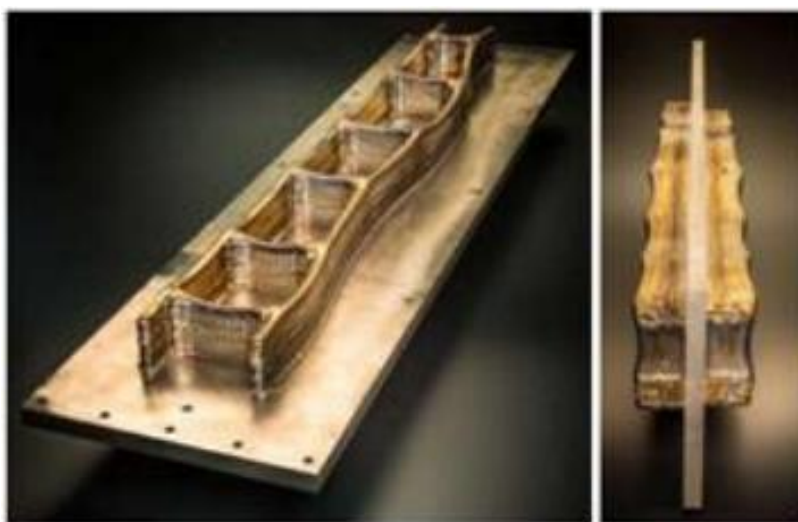
Slika 26. Dio velike složenosti izrađen WAAM postupkom [29]

Na slici 27. je prikazano kako je moguće pomoću WAAM postupka napraviti zatvorenu konstrukciju bez potpornja. Napravljen je polukrug radijusa 50 mm. [28]



Slika 27. Polukružna konstrukcija izvedena WAAM postupkom [28]

Na slici 28. prikazana je potporna konstrukcija krila aviona duljine 1,2 m, napravljeno za tvrtku BAE Systems od titanove legure Ti6Al4V. Da bi se izbjeglo deformiranje radnog komada, krilo je izrađeno na obje strane, nakon izrade dio je podvrgnut toplinskoj obradi prije odvajanja od ploče. [30]



Slika 28. Potporna konstrukcija krila zrakoplova od Ti6Al4V [30]

Slika 29. prikazuje čelični stožac izrađen CMT postupkom. Količina depozita iznosi 2,6 kg/h, debljina zida je 2,5 mm, a obrađeni dio će imati 2 mm. BTF omjer iznosi 1,25. [26]



Slika 29. Čelični stožac [26]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno odrediti optimalne parametre MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Također je bilo potrebno odrediti odgovarajuće dodatne materijale i zaštitne plinove te razine unosa topline, te na kraju ispitati mehanička svojstva načinjenog izratka. Eksperimentalni rad proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

5.1. Opis eksperimenta

Prvi dio eksperimenta odvijao se u Laboratoriju za zavarivanje, počelo je pripremom podloge za zavarivanje, to uključuje čišćenje i brušenje od raznih nečistoća. Odabran je čelik S355 debljine 20 mm i dodatni materijal (žica promjera 1,2 mm) SG2 (katalog Elektroda Zagreb) te zaštitni plin 82% Ar i 18% CO₂ protoka 22 l/min. Nakon toga je slijedilo proučavanje i optimizacija odgovarajućih parametara kojim će se napraviti 2 zida visine 350 mm i širine 10 mm. Određeno je da će se zavarivanje provoditi strujom jakosti 155 A i naponom 20 V s međuprolaznom temperaturom od 100 °C. Svi parametri ostaju isti samo se mijenja brzina zavarivanja koja je kod uzorka 1 bila 25 cm/min, dok je kod uzorka 2 bila 30 cm/min. Kut nagiba pištolja za zavarivanje je 0° i tehnika rada je neutralna. Nakon zavarivanja je slijedilo razdvajanje uzoraka ručnim plinskim rezanjem.

Drugi dio eksperimenta odvijao se u Laboratoriju za alatne strojeve gdje se je napravila po jedna ispitna epruveta iz svakog uzorka prema normi ISO 6892-1 2009.

Treći dio eksperimenta obuhvaća makroanalizu, statički vlačni pokus te mjerenje tvrdoće i analizu rezultata.

5.2. Oprema za zavarivanje

Oprema za zavarivanje sastoji se od izvora struje za zavarivanje Welbee P500L, modula za precizno linijsko vođenje Bug-O Systems MDS – 1002, plinske boce s argonom i ugljičnim dioksidom te pištolja za zavarivanje.



Slika 30. Oprema za WAAM postupak zavarivanja [31]

5.2.1. Izvor struje za zavarivanje

Izvor struje korišten u eksperimentu je Welbee P500L tvrtke DAIHENVARSTROJ. To je MIG/MAG aparat za zavarivanje sa sinergijskim funkcijama. Pogodan je za zavarivanje raznih vrsta materijala i ima sinergijske funkcije za nehrđajući čelik, aluminij i aluminijeve legure, titan i titanove legure, meke čelike i bakar. Kod ovakvog uređaja sa sinergijskim funkcijom potrebno je odabrati samo dva parametra (u ovom slučaju napon i jakost struje) dok uređaj određuje sam ostale parametre. Slika 31. prikazuje navedeni izvor struje za zavarivanje, slika 32. odabrane parametre zavarivanja, a tablica 9. karakteristike istoga.



Slika 31. Izvor struje Welbee P500L [31]



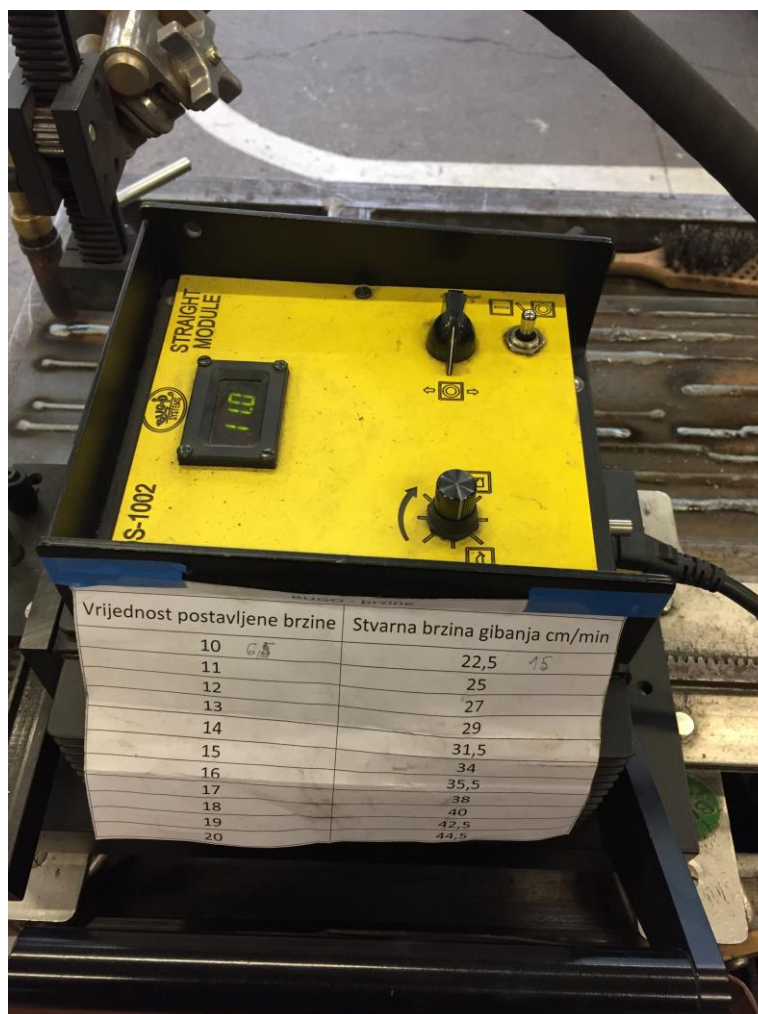
Slika 32. Odabrani parametri kod eksperimenta [31]

Tablica 9. Karakteristike Welbee P500L izvora struje za zavarivanje [32]

Napon napajanja (+/- 15 %), V	400
Broj faza	3
Određena ulazna snaga, kVA	25
Određeni radni ciklus, %	DC = 60 100 / Pulse = 80
Određena struja zavarivanja, A	DC = 500 410 / Pulse = 400
Određeni napon, V	DC = 39 / Pulse = 34
Jačina struje zavarivanja, A	DC = 30 - 500 / Pulse = 30 – 400
Izlazni napon, V	DC = 12 - 39 / Pulse = 12 – 34
Maksimalni određeni napon, V	80
Težina, kg	83
Dimenzije Š / V / D, mm	395 / 710 / 592

5.2.2. Modul za precizno linijsko vođenje

U eksperimentu je korišten Bug-O Systems MDS – 1002 modul za precizno linijsko vođenje zavarivanja. Modul je postavljen na vodilicu koju osigurava pravocrtno gibanje, te je na isti montiran pištolj za zavarivanje kako je prikazano na slici 33. Uređaj ima raspon brzine gibanja također prikazan na slici 33.



Slika 33. Bug-O Systems MDS - 1002 uređaj [31]

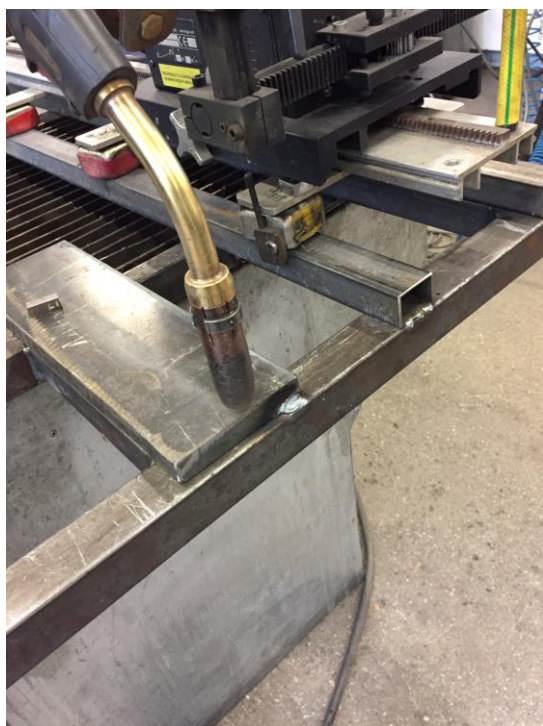
5.2.3. Dodatni materijal (žica za zavarivanje) i osnovni materijal

Žica korištena u eksperimentu je EZ-SG2 promjera 1,2 mm, proizvođača Elektroda Zagreb (prema EN ISO 14341-A oznaka G 42 2 C/M 3Si1). Navedena žica se koristi za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm². Na slici 34. su prikazane specifikacije korištene žice.

<

Slika 34. Specifikacije žice EZ-SG 2 [33]

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je čelik oznake S355 debljine 20 mm (prema HRN EN 10025-2: 2004). Navedeni čelik spada u grupu nelegiranih konstrukcijskih čelika. Prije zavarivanja je dobro pripremljen, očišćen od nečistoća te pričvršćen (pripojen) sa svake strane na radnu ploču kako bi se izbjegla deformacija, vidljivo na slikama 35. i 36.



Slika 35. i slika 36. Prikaz načina na koji je pričvršćen osnovni materijal na radnu ploču [31]

5.2.4. Parametri zavarivanja

Tijekom izrade zidova kod oba uzorka pomičnim mjerilom je mjerena visina nakon svakog prolaza. Napon struje je iznosio 20 V, a jačina struje 155 A. Mijenjana je samo brzina zavarivanja koja je kod uzorka 1 iznosila 25 cm/min (11 prema Bug-O Systems MDS – 1002 modulu), dok je kod uzorka 2 iznosila 30 cm/min (13,4 prema Bug-O Systems MDS – 1002 modulu). Slobodni kraj žice je iznosio 10 mm. Nakon svakog prolaza izračunat je unos topline prema sljedećem izrazu:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \quad (2)$$

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MAG postupka iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

Između svakog prolaza je izvršeno hlađenje komprimiranim zrakom kako bi se postigla međuprolazna temperatura od 100 °C. Međuprolazna temperatura mjerena je uređajem Fluke IR Thermometer koji mjeri temperaturu beskontaktno (prikazan na slici 37.).



Slika 37. Mjerenje temperature međuprolaza [31]

Tablice 10. i 11. prikazuju parametre nakon svakog prolaza za uzorke. Izvor struje sam vrši prilagodbu jakosti struje ovisno o uvjetima zavarivanja (iako je zadana jakost od 155 A) te je navedena srednja vrijednost svakog prolaza u tablici. Mjerena je visina svakog prolaza, dok je visina svakog drugog mjerena u 3 točke duž zavora. Razlog je otežano mjerenje zbog položaja pištolja za zavarivanje.

Tablica 10. Parametri zavarivanja kod uzorka 1

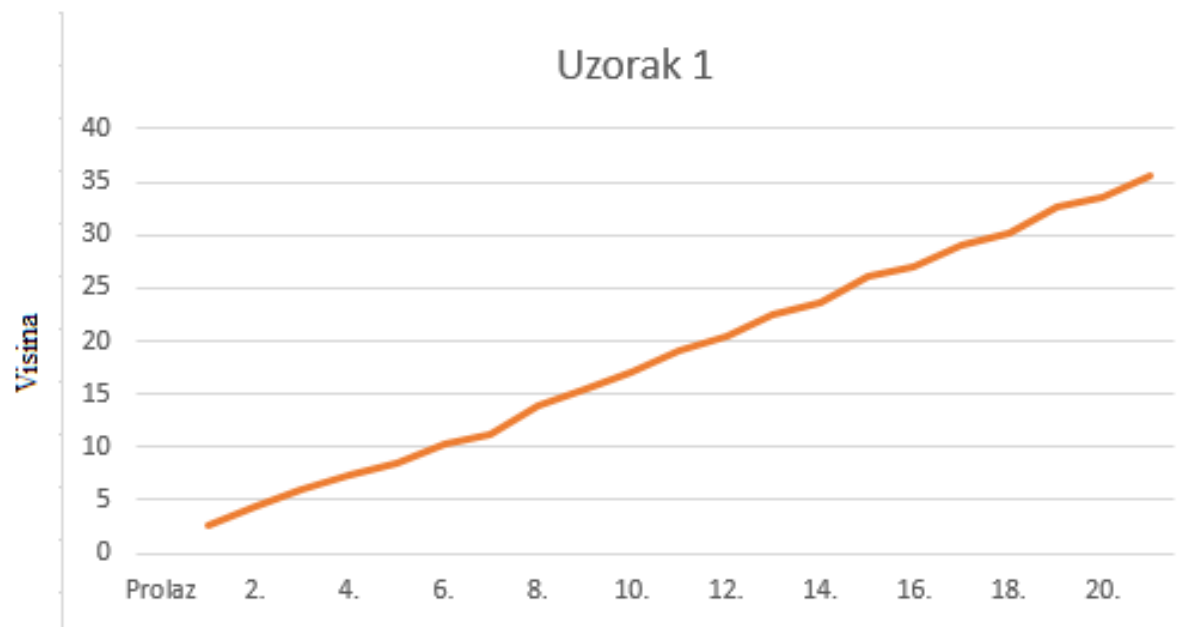
Prolaz	Visina, mm			Jakost struje, A	Unesena toplina, kJ/cm
1.	2,8	2,5	2,9	170	6,53
2.		4,4		169	6,49
3.	5,8	6,0	6,0	170	6,53
4.		7,3		165	6,33
5.	8,7	8,5	8,6	169	6,49
6.		10,3		167	6,41
7.	12,1	11,1	12,1	168	6,45
8.		14,0		165	6,33
9.	15,4	15,4	15,6	169	6,49
10.		17,0		166	6,37
11.	18,8	19,2	18,9	170	6,53
12.		20,5		168	6,45
13.	22,1	22,5	22,0	167	6,41
14.		23,7		166	6,37
15.	25,9	26,2	26,0	170	6,53
16.		27,0		165	6,33
17.	28,5	29,0	29,0	166	6,37
18.		30,2		164	6,30
19.	31,9	32,6	32,5	172	6,60
20.		33,6		165	6,33
21.	34,9	35,5	35,6	170	6,53

Brzina zavarivanja kod uzorka 1 je bila 25 cm/min, napon je bio konstantan u iznosu od 20 V.

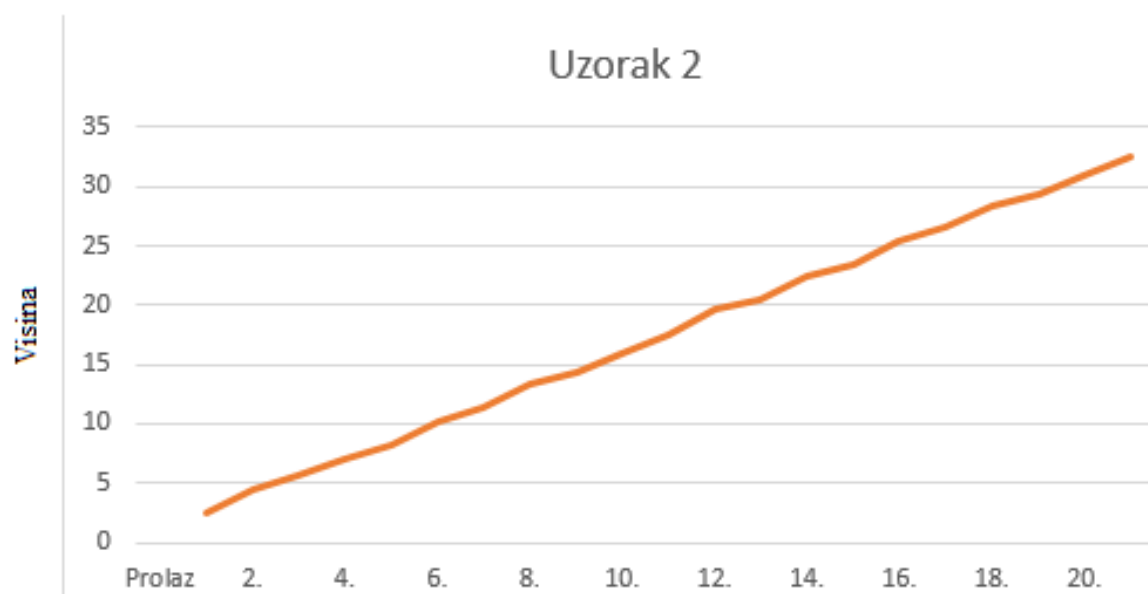
Tablica 11. Parametri zavarivanja kod uzorka 2

Prolaz	Visina, mm			Jakost struje, A	Unesena toplina, kJ/cm
1.		2,5		159	5,08
2.	4,3	4,5	4,3	166	5,31
3.		5,7		160	5,12
4.	7,0	7,1	7,4	168	5,37
5.		8,2		169	5,41
6.	10,3	10,1	10,3	167	5,34
7.		11,4		162	5,18
8.	13,0	13,3	13,5	160	5,12
9.		14,4		161	5,15
10.	16,3	16,0	16,4	163	5,21
11.		17,5		165	5,28
12.	19,9	19,6	19,3	170	5,44
13.		20,4		163	5,21
14.	22,0	22,5	22,6	168	5,37
15.		23,5		163	5,21
16.	25,1	25,5	25,6	171	5,47
17.		26,5		163	5,21
18.	28,3	28,4	28,5	172	5,50
19.		29,4		166	5,31
20.	31,4	30,9	31,3	170	5,44
21.		32,5		162	5,18
22.	34,4	34,5	34,6	165	5,28
23.		35,7		165	5,28

Brzina zavarivanja kod uzorka 2 je bila 30 cm/min, napon je bio konstantan u iznosu od 20 V.



Slika 38. Mjerenje visine zavora – uzorak 1



Slika 39. Mjerenje visine zavora – uzorak 2

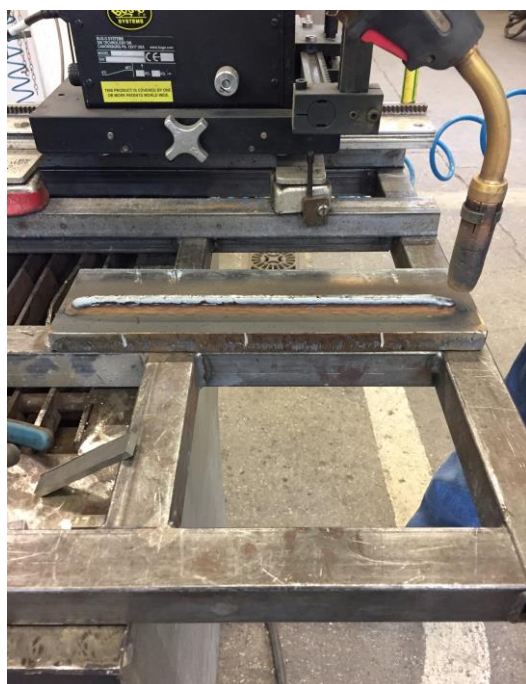
Analizom rezultata vidljivo je da se povećanjem brzine zavarivanja povećava i broj prolaza za istu visinu navarenog zida. Razlog toga je što se povećanjem brzine zavarivanja smanjuje penetracija te pada visina svakog prolaza. To se također vidi usporedbom unosa topline koji je kod uzorka 2 značajno manji nego kod uzorka 1. Iz istog razloga je širina navarenog zida kod uzorka 2 nešto manja nego kod uzorka 1. Slike 40., 41., 42., 43., 44. i 45. prikazuju tijek zavarivanja uzorka 1. Fotografiran je svaki peti prolaz i zadnji prolaz.



Slika 40. Uzorak 1 - 1. prolaz [31]



Slika 41. Uzorak 1 - 5. prolaz [31]



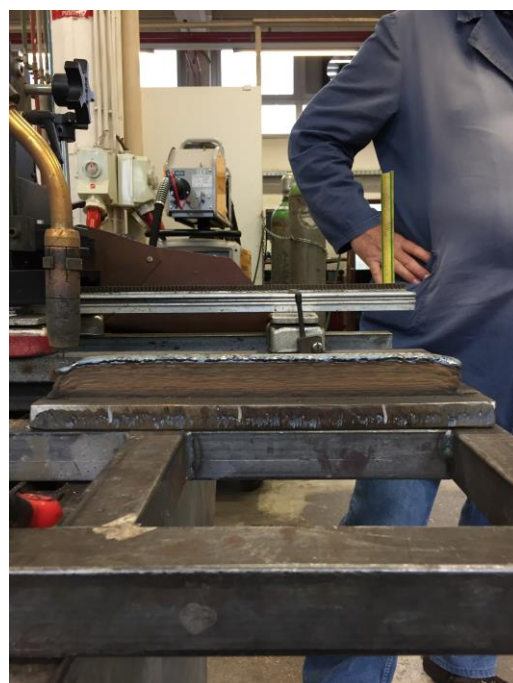
Slika 42. Uzorak 1 - 10. prolaz [31]



Slika 43. Uzorak 1 - 15. prolaz [31]



Slika 44. Uzorak 1 - 20. prolaz [31]



Slika 45. Uzorak 1 - zadnji prolaz [31]

Slike 46., 47., 48., 49., 50. i 51. prikazuju tijek zavarivanja uzorka 2. Fotografiran je svaki peti i zadnji prolaz.



Slika 46. Uzorak 2 - 1. prolaz [31]



Slika 47. Uzorak 2 - 5. prolaz [31]



Slika 48. Uzorak 2 - 10. prolaz [31]



Slika 49. Uzorak 2 - 15. prolaz [31]



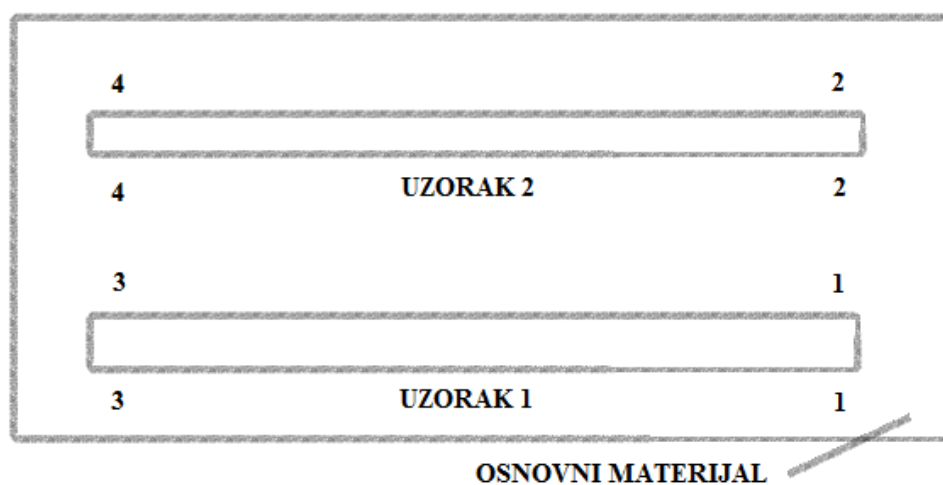
Slika 50. Uzorak 2 - 20. prolaz [31]



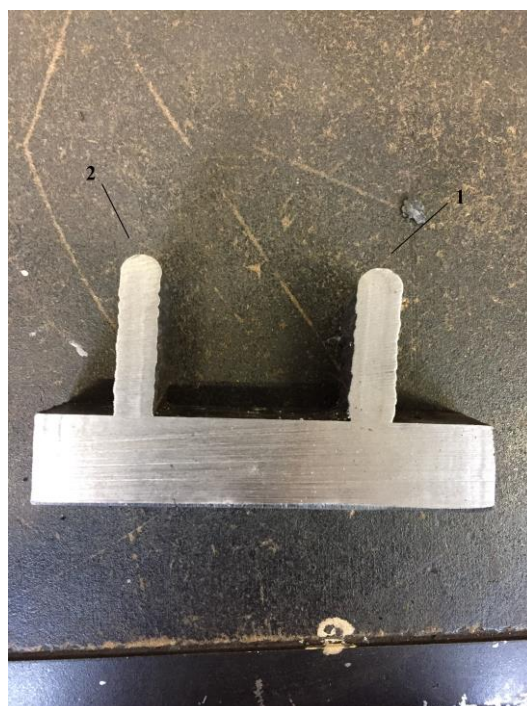
Slika 51. Uzorak 2 –zadnji prolaz [31]

5.3. Ispitivanja uzoraka 1 i 2

Nakon završetka zavarivanja uzorci su podvrgnuti ispitivanjima makroanalizi, ispitivanju tvrdoće i statičkom vlačnom pokusu.. Uzorci su najprije razrezani tračnom pilom IMET tip GBS 185 Eco AutoCut. Kod svakog uzorka je izrezana sredina iz koje su kasnije izrađene ispitne epruvete za statičko vlačni pokus te su ostavljeni krajevi na kojima se radila makroanaliza i mjerenje tvrdoće. Svaki uzorak ima 2 kraja koji su označeni brojevima 1, 2, 3 i 4 kako je prikazano na slici 50. Krajevi 1 i 2 izrezani su bliže kraju uzoraka, otprilike 15 mm od kraja. Krajevi 3 i 4 izrezani su bliže sredini uzoraka, otprilike 35 mm od kraja. Razlog tome je kako bi se kod mjerenja tvrdoće vidjelo ima li neke značajnije razlike u tvrdoći segmenta koji je bliže sredini zida u odnosu na krajeve zida. Krajevi su ručno izbrušeni brusnim papirom sljedećim granulacijama: P120, P320 i P600. Slike 51. i 52. prikazuju pripremljene makroizbruske koji su nakon toga poslani na fino brušenje.



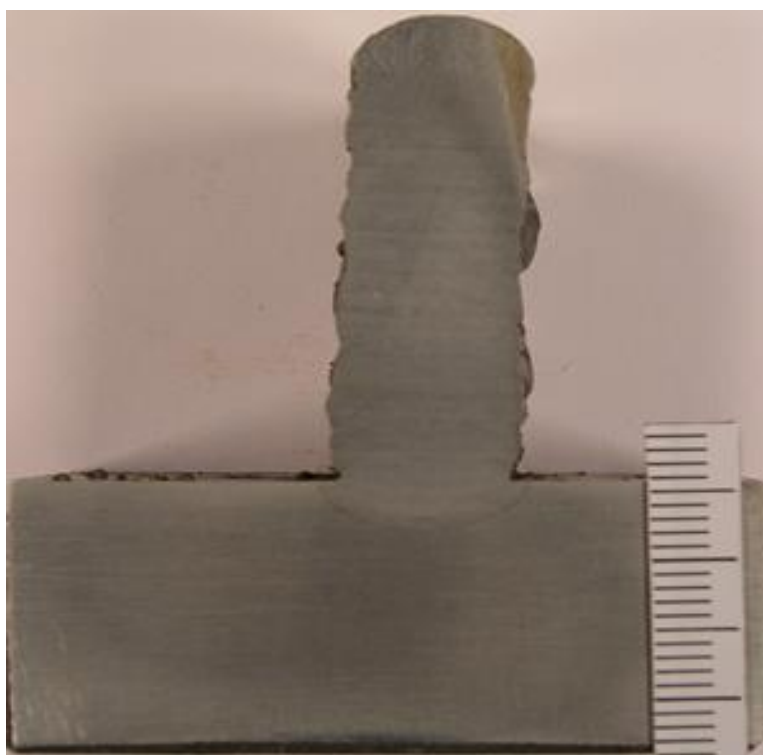
Slika 52. Shematski prikaz uzoraka i označenih krajeva



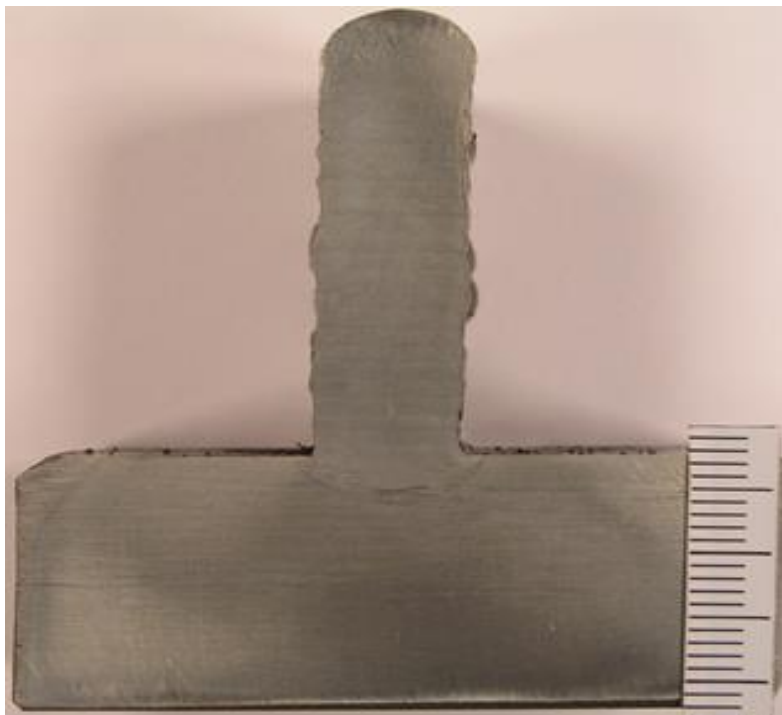
Slika 53. i slika 54. Prikaz krajeva uzoraka 1 i 2 pripremljenih za makroanalizu [31]

5.3.1. Makroanaliza

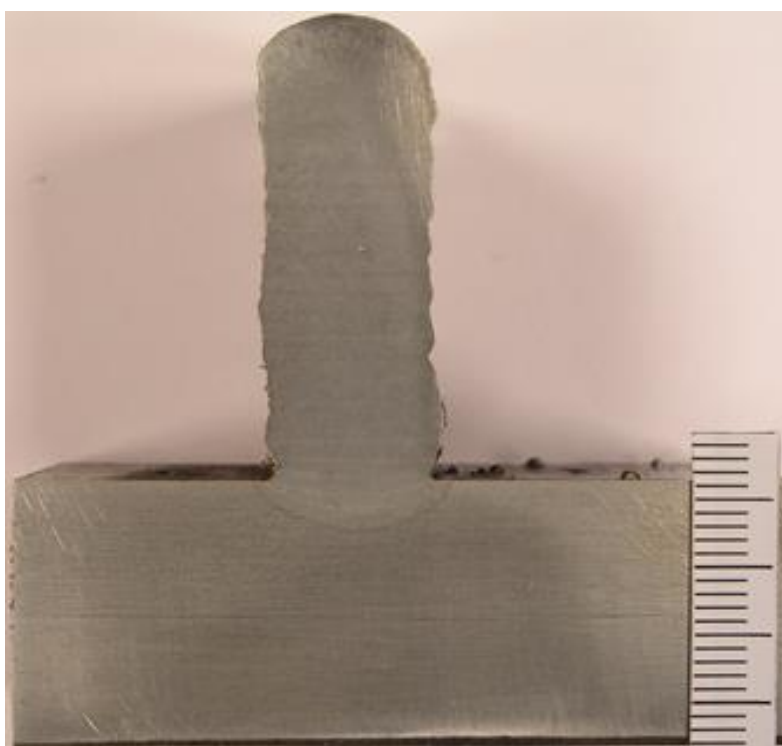
Makroanaliza je provedena u Laboratoriju za metalografiju gdje je najprije napravljeno fino strojno brušenje. Brzina brušenja je bila 300 okretaja/min kod svih hrapavosti brusnog papira, tijekom svih faza finog brušenja korišteno je vodenno hlađenje. Brusni papiri su se koristili sljedećim redom: P320, P500, P1000, P2000, P4000. Nakon fine obrade uzorci su nagriženi u 3-postotnoj otopini nitala te fotografirani su digitalnim fotoaparatom Olympus C-5050.



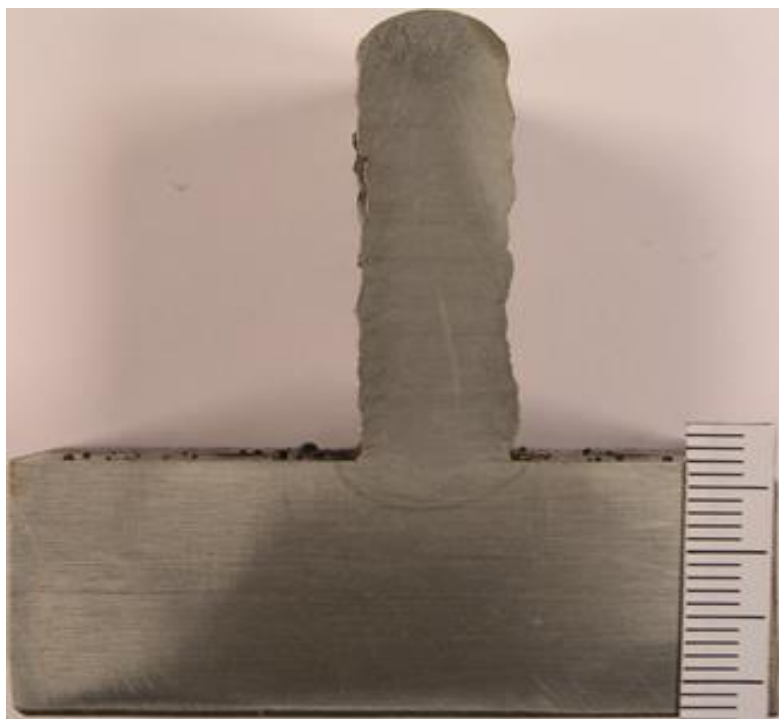
Slika 55. Makroanaliza uzorka 1 - kraj 1 [31]



Slika 56. Makroanaliza uzorka 2 - kraj 2 [31]



Slika 57. Makroanaliza uzorka 1 - kraj 3 [31]



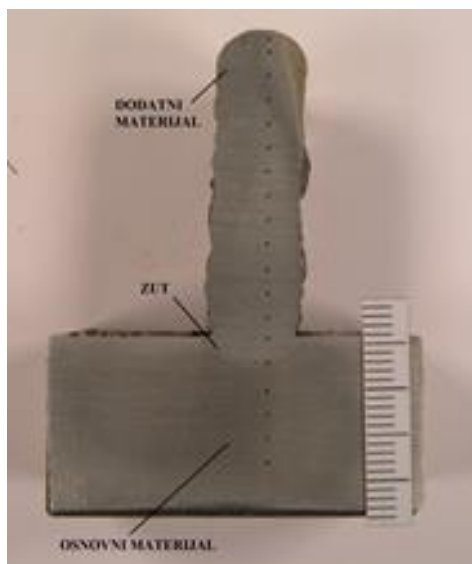
Slika 58. Makroanaliza uzorka 2 - kraj 4 [31]

Na makroizbruscima nisu uočene veće nepravilnosti, kod svakog uzorka je jasno vidljiva zona utjecaja topline te je također vidljivo da je penetracija relativno mala. Struktura svakog uzorka je sitnozrnata zbog popuštanja i normalizacije koja nastupa nakon svakog sljedećeg prolaza. Tek se kod završnih prolaza uzoraka primjećuje malo grublja struktura jer nema slojeva iznad koji bi doveli do normalizacije.

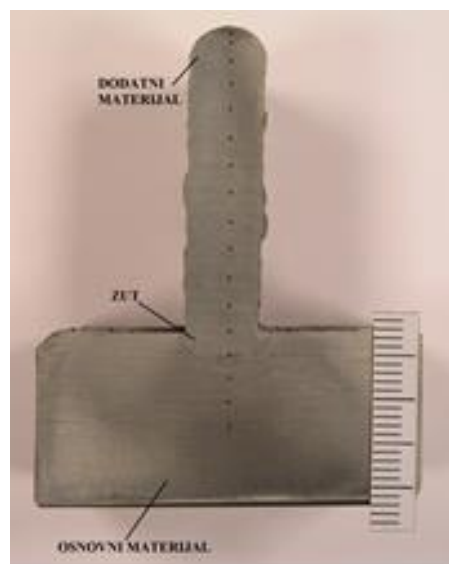
5.3.2. Mjerenje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće uzoraka mjereno je po Vickersu (HV 10) u metalu zavara (zidu), zoni utjecaja topline i osnovnom materijalu. Ispitivanje je provedeno na tvrdomjeru REICHTER proizvedenom u Njemačkoj 1977. godine. Mjerenje se vršilo vertikalno od vrha prema osnovnom materijalu na svakom uzorku. Razmak između prve dvije točke je 1 mm kako bi se dobila 2 mjerenja pri samom vrhu gdje je drugačija struktura, a ostali razmaci su po

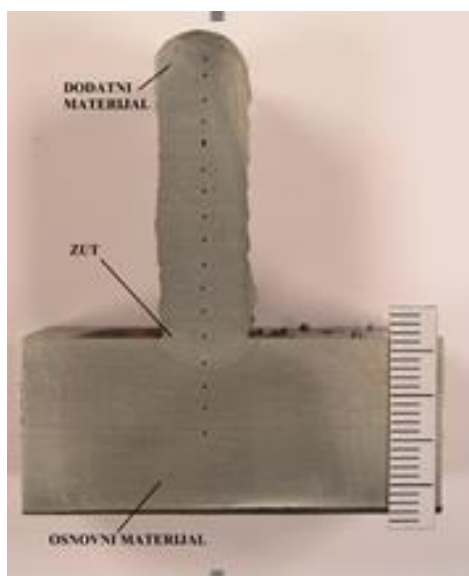
3 mm kako je i prikazano na slikama 57., 58., 59. i 60. Na svakom uzorku je provedeno 17 mjerenja. Od toga je prvih 13 u dodatnom materijalu, 14. u zoni utjecaja topline i zadnja 3 u osnovnom materijalu.



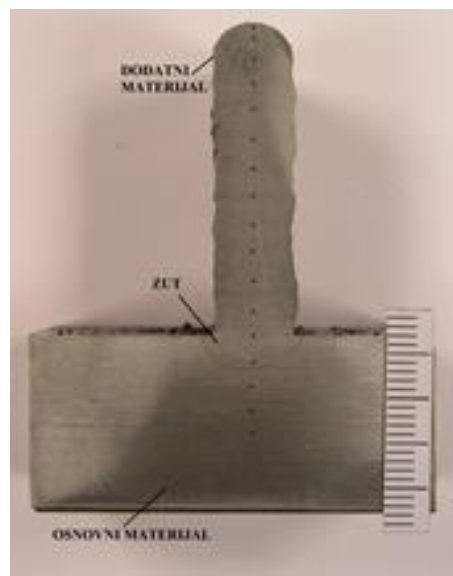
Slika 59. Uzorak 1 - kraj 1 [31]



Slika 60. Uzorak 2 - kraj 2 [31]



Slika 61. Uzorak 1 - kraj 3 [31]



Slika 62. Uzorak 2 - kraj 4 [31]

U sljedećim tablicama su prikazani rezultati mjerenja tvrdoće.

Tablica 12. Mjerenje tvrdoće uzorka 1 -**kraj 1**

Broj mjerenja	Dijagonala, mm	HV 10
1.	0,334	166
2.	0,328	172
3.	0,353	148,8
4.	0,339	161
5.	0,351	150,5
6.	0,337	163
7.	0,353	148,8
8.	0,348	153
9.	0,344	157
10.	0,343	158
11.	0,351	150,5
12.	0,334	166
13.	0,334	166
14.	0,296	212
15.	0,335	165
16.	0,338	162
17.	0,343	158

Tablica 13. Mjerenje tvrdoće uzorka 1 -**kraj 3**

Broj mjerenja	Dijagonala, mm	HV 10
1.	0,339	161
2.	0,326	175
3.	0,352	149,7
4.	0,347	154
5.	0,353	148,8
6.	0,357	145,5
7.	0,350	151,4
8.	0,356	146,3
9.	0,347	154
10.	0,345	156
11.	0,344	157
12.	0,347	154
13.	0,321	180
14.	0,295	213
15.	0,330	170
16.	0,350	151,4
17.	0,350	151,4

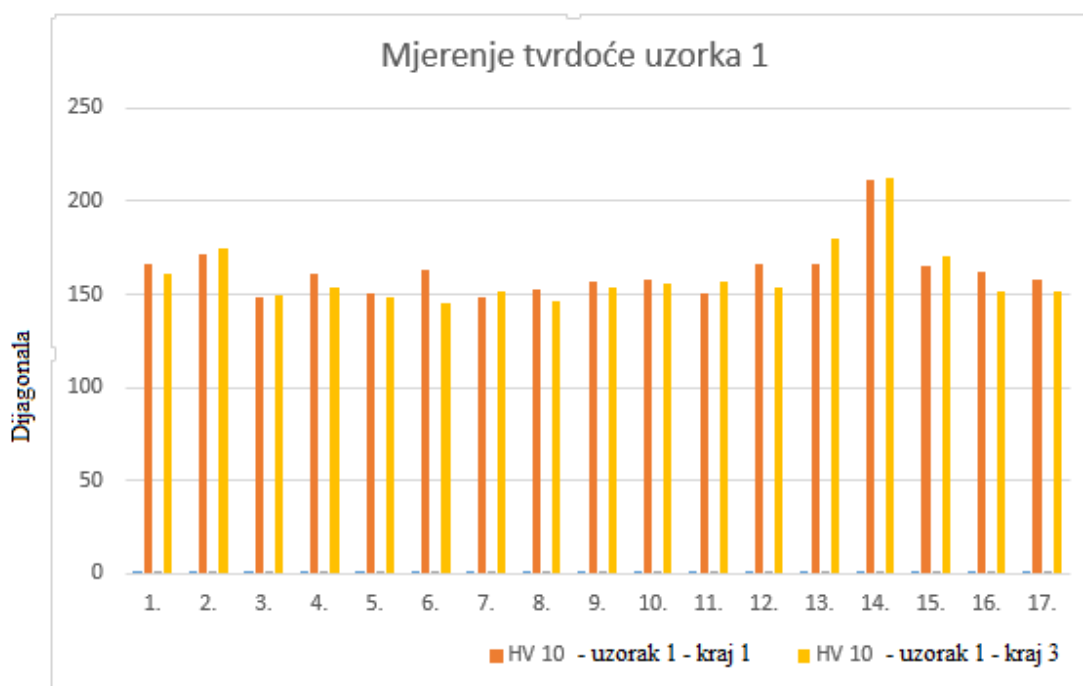
Tablica 14. Mjerenje tvrdoće uzorka 2**- kraj 2**

Broj mjerjenja	Dijagonala, mm	HV 10
1.	0,315	187
2.	0,324	177
3.	0,338	162
4.	0,343	158
5.	0,352	149,7
6.	0,343	158
7.	0,343	158
8.	0,345	156
9.	0,332	168
10.	0,339	161
11.	0,343	158
12.	0,320	181
13.	0,319	182
14.	0,290	221
15.	0,333	170
16.	0,338	162
17.	0,357	145,5

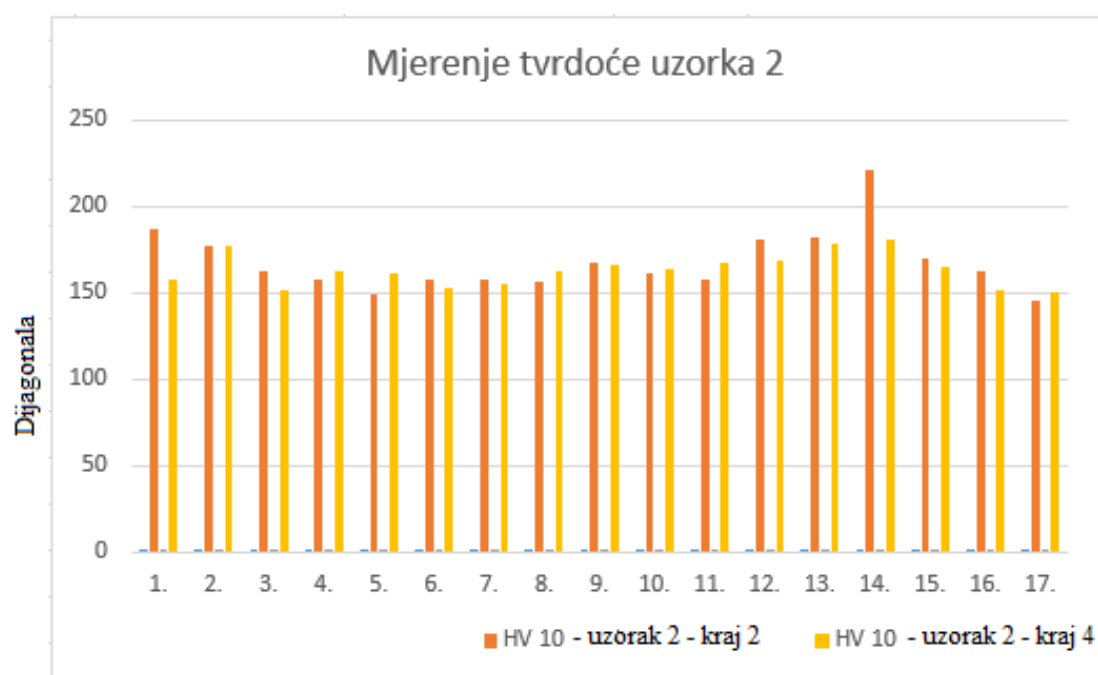
Tablica 15. Mjerenje tvrdoće uzorka 2**- kraj 4**

Broj mjerjenja	Dijagonala, mm	HV 10
1.	0,343	158
2.	0,324	177
3.	0,350	151,4
4.	0,338	162
5.	0,339	161
6.	0,348	153
7.	0,346	155
8.	0,338	162
9.	0,334	166
10.	0,336	164
11.	0,333	167
12.	0,331	169
13.	0,323	178
14.	0,320	181
15.	0,335	165
16.	0,350	151,4
17.	0,351	150,5

Iz analize rezultata vidljivo je da je kod svih uzoraka najmanja tvrdoća u osnovnom materijalu dok je najveća u ZUT-u (zoni utjecaja topline). Tvrdoća u dodatnom materijalu je nešto manja zbog toga što je manje odvođenje topline. Iz istog razloga je pri vrhu blagi porast tvrdoće te je zato i drugačija struktura (po veličini zrna). Krajevi odrezani bliže sredini zavarenog zida nisu pokazali neke značajnije promjene u tvrdoći od krajeva koji su odrezani dalje od sredine. Detaljnija analiza rezultata prikazana je na slikama 63. i 64.



Slika 63. Dijagram rezultata tvrdoće uzorka 1



Slika 64. Dijagram rezultata tvrdoće uzorka 2

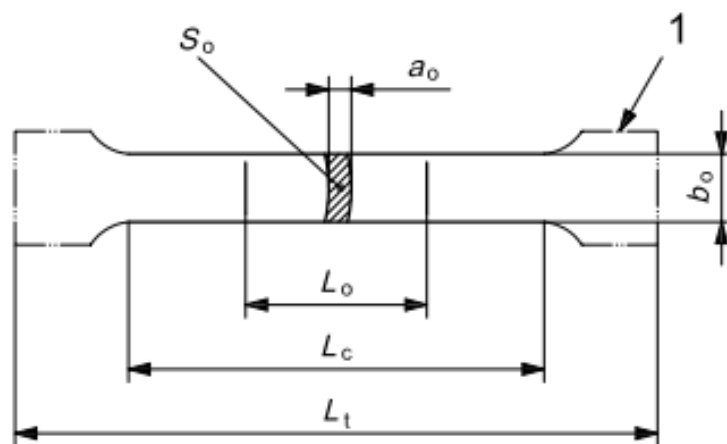
5.3.3. Statički vlačni pokus

Za statički vlačni pokus trebalo je izraditi epruvetu iz svakog zida. Prije obrade u Laboratoriju za alatne strojeve svaki uzorak se plinskim ručnim rezanjem odvojio od osnovnog materijala i izbrušena je površina zida kako bi se skinuo srh sa svake strane što je vidljivo na slici 65.

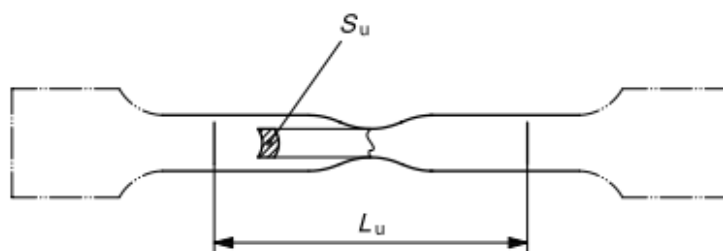


Slika 65. Pripremljeni i označeni uzorci za izradu ispitnih epruveta [31]

Dimenzije epruveta određene su prema ISO 6892-1:2009.



Slika 66. Dimenzije ispitnih epruveta prije testiranja [34]



Slika 67. Dimenzije ispitnih epruveta nakon testiranja [34]

a_o – početna debljina epruvete, mm

b_o – početna širina ispitnog područja epruvete, mm

L_c – duljina suženog dijela epruvete, mm

L_o – duljina ispitnog područja epruvete, mm

L_t – ukupna duljina epruvete, mm

(3)

L_u – duljina ispitnog područja epruvete nakon testiranja, mm

S_o – površina ispitnog područja epruvete, mm²

S_u – površina ispitnog područja epruvete nakon testiranja, mm²

l – krajevi za prihvat.

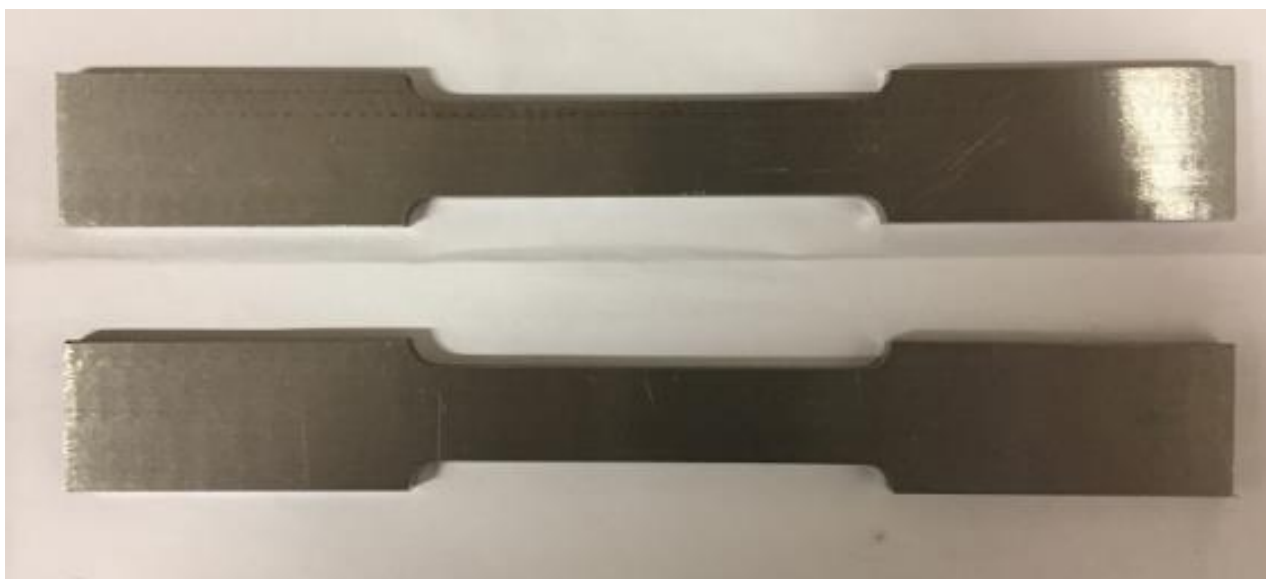
Određene su sljedeće dimenzije epruveta:

$$a_o = 6 \text{ mm}$$

$$b_o = 20 \text{ mm}$$

$$L_c = 90 \text{ mm}$$

$$L_o = 60 \text{ mm}$$



Slika 68. Ispitne epruvete (uzorak 1 – gornja, uzorak 2 – donja) [31]

Ispitivanje se provodilo na kidalici tvrtke HECKERT koja je povezana s računalom koje mjeri vlačnu čvrstoću (R_m), konvencionalnu granicu razvlačenja ($R_{p0,2}$) i silu razvlačenja (F_m) te ispisuje dijagram naprezanja. Kidalica i uzorak prikazani su na slici 69. Slike 70. i 71. prikazuju ispitne epruvete nakon testiranja te se mjeri produljenje i suženje epruvete nakon testiranja.



Slika 69. Kidalica i uzorak 1 postavljen za testiranje [31]



Slika 70. Uzorak 1 nakon testiranja [31]



Slika 71. Uzorak 2 nakon testiranja [31]

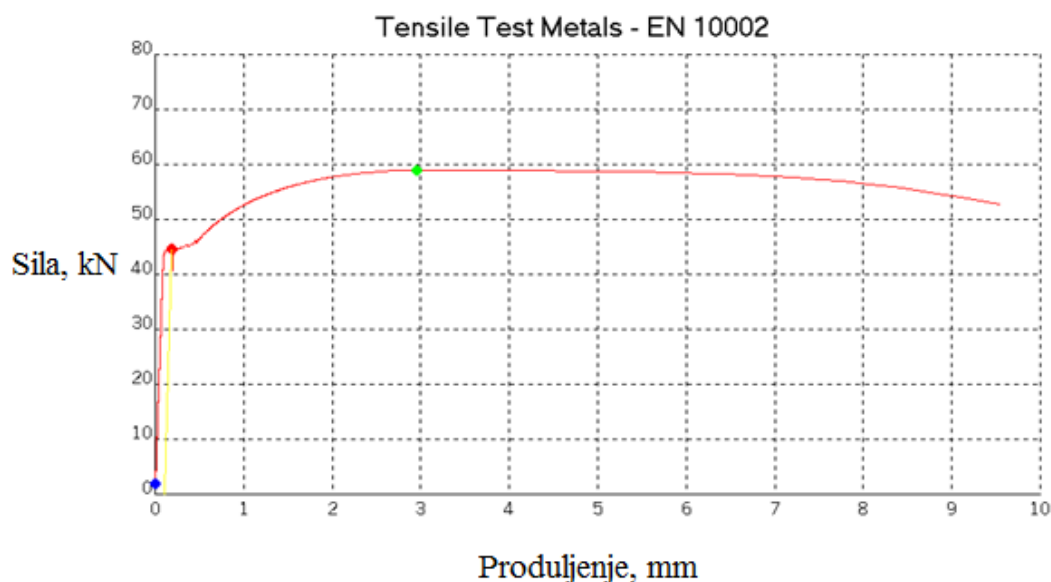
Dimenzije uzorka 1 nakon testiranja:

$$a_u = 2,65 \text{ mm}$$

$$b_u = 12,99 \text{ mm}$$

$$L_u = 81,85 \text{ mm}$$

Duljina ispitnog područja uzorka 1 se produljila za 21,85 mm što je istezanje od 26,7 % (A_5) što je vrlo dobar rezultat koji zadovoljava i mehaničke specifikacije dodatnog materijala (žice EZ- SG2) gdje prema katalogu piše da je istezljivost veća od 22%.



Slika 72. Dijagram naprezanja za uzorak 1 [31]

Rezultati mjerenja:

$$R_{p0,2} = 364,66 \text{ N/mm}^2$$

$$R_m = 482,18 \text{ N/mm}^2$$

$$F_m = 58,96 \text{ kN}$$

Vlačna čvrstoća (R_m) je na donjoj granici prema katalogu za dodatni materijal što je dosta dobar rezultat s obzirom da je bilo usporeno hlađenje, odnosno odvođenje topline jer je išao sloj na sloj.

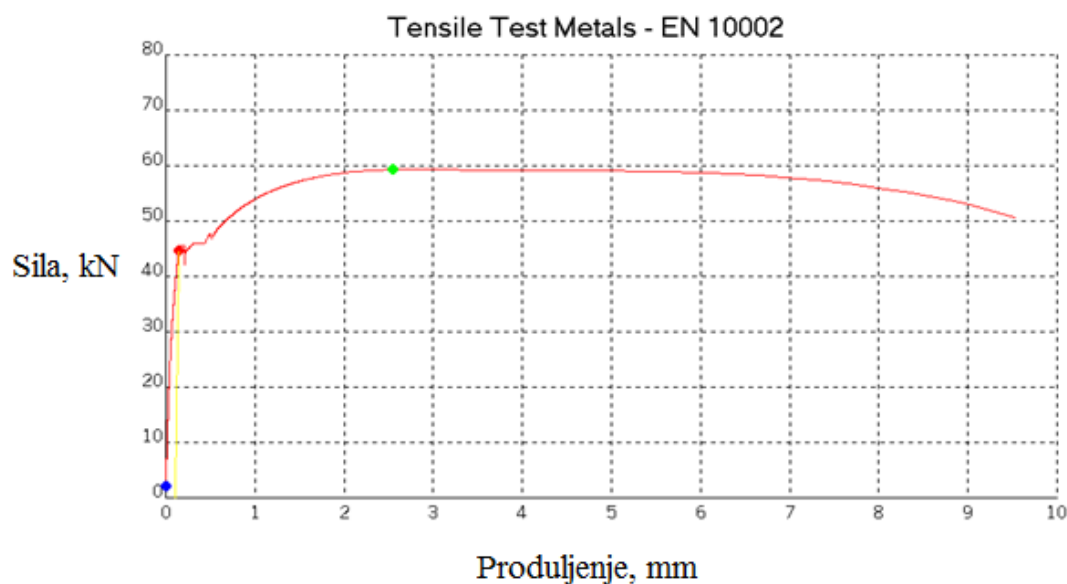
Dimenzije uzorka 2 nakon testiranja:

$$a_u = 6,05 \text{ mm}$$

$$b_u = 13,58 \text{ mm}$$

$$L_u = 80,16 \text{ mm}$$

Duljina ispitnog područja epruvete 2 produljila se za 20,16 mm što je istezanje (A_5) od 25,1 % i također zadovoljava specifikacije dodatnog materijala prema katalogu. Istezljivost je nešto manja od uzorka 1.



Slika 73. Dijagram naprezanja za uzorak 2 [31]

Rezultati mjerenja:

$$R_{p0,2} = 368,61 \text{ N/mm}^2$$

$$R_m = 488,73 \text{ N/mm}^2$$

$$F_m = 59,28 \text{ kN}$$

Kao i kod uzorka 1 vlačna čvrstoća je postigla dosta dobar rezultat s obzirom na otežano odvođenje topline. Rezultati mjerenja su vrlo slični za oba uzorka što znači da brzina zavarivanja nije bitno utjecala na mehanička svojstva zavara.

6. ZAKLJUČAK

MAG CBT postupak je modificirani postupak zavarivanja kojim se uspješno uklonio, odnosno smanjio najveći nedostatak konvencionalnog načina prijenosa metala, rasprskavanje. Zahvaljujući novorazvijenim i visokobrzinskim mikroprocesorima kojima se precizno predviđa pojava električnog luka i smanjuje unos topline, a povećava brzina zavarivanja i depozit zavarivanja se podiže na novu razinu u proizvodnji.

MAG postupak za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (engl. WAAM) sve više zauzima mjesto među ostalim tehnologijama zavarivanja za primjenu u industriji. Glavni razlozi su što WAAM postupak omogućava izradu dijelova s minimalnim troškovima naknadne obrade odvajanjem čestica i uštedom materijala. Upravo iz tih razloga je WAAM poželjna tehnologija pri zavarivanju skupocenih metala. Karakteristika je i mogućnost izrade srednjih do velikih dijelova radi visoke količine depozita, zatim neograničeni volumen izrade, izrada vrlo složenih geometrija te niski BTF omjer. Svi ti čimbenici su doveli do uvođenja WAAM postupka zavarivanja u zrakoplovnu i automobilsku industriju.

Eksperimentalni dio je dao zadovoljavajuće rezultate za WAAM zavarivanje čelika. Struktura zavarenog zida nije imala većih grešaka. Razlika pri vrhu zida i grublje strukture prema veličini zrna u odnosu na sitnozrnatu je zbog popuštanja i normalizacije što je povezano s prolazima iznad, odnosno ispod zadnjeg sloja. Kod ispitivanja tvrdoće pokazalo se da je zavareni zid postigao više vrijednosti tvrdoće od osnovnog materijala kod oba uzorka. Statički vlačni pokus je također pokazao slične rezultate kakvi su navedeni na specifikaciji dodatnog materijala (žice) u katalogu što se tiče mehaničkih svojstava. Također se može zaključiti da promjena brzine zavarivanja nije utjecala na mehanička svojstva i kvalitetu zavarenog zida, rezultirala je nešto užom širinom zida (0,2 mm) te većim brojem prolaza kod veće brzine zavarivanja (bila su potrebna 2 sloja više kako bi se postigla ista visina zida). Pri odabranim parametrima (jakost struje od 155 A i napon od 20 V) proces je bio vrlo stabilan i porast visine je bio linearan kod izrade oba uzorka (između 1 mm i 2 mm).

Može se zaključiti da WAAM tehnologija ima još prostora za napredak i da će u budućnosti imati veliku ulogu u svim jačim granama industrije.

LITERATURA

- [1] Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja, Nikola Babić, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [2] Određivanje dinamičke karakteristike MAG zavarivanja, Andro Puče, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [3] Termini i definicije kod zavarivanja, Dr.sc. Ivan Samardžić, izv. prof., Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2012.
- [4] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>, dostupno 15.04.2017.
- [5] O'Brien, A. (Ed.): Welding handbook (9th edition) Volume 2, Welding processes; American Welding Society, Miami, USA, 2004.
- [6] Uticaj parametara zavarivanja na kvalitet zavara izvedenih MAG zavarivanjem, Bajrush Bytyqi, prof., Hysni Osmani, prof., Ferit Idrizi, ass., Fojnica, 2005.
- [7] Parametri zavarivanja i njihov uticaj na kvalitet i vizuelni izgled zavarenog spoja, Srboľjub Stevanović-inženjer zavarivanja EWE, PP prezentacija - <http://www.alatistherm.co.rs/pdf.zavarivanje/ParametriZavarivanja.pdf>, dostupno 16.04.2017.
- [8] https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTfqxyWyVdpTQe-qD0gapgRq10Wy3yQF_YvAg_RELxv7I7HA0RQg, dostupno 16.04.2017.
- [9] MIG/MAG-elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina; PP prezentacija; doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing., Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [10] Priručnik iz kolegija Strojari i oprema za zavarivanje, doc.dr.sc. Ivica Garašić, prof.dr.sc. Zoran Kožuh, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [11] Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Maja Jurica, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [12] MAG CBT zavarivanje s trokomponentnim plinskim mješavinama, Martin Sinković, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [13] PP prezentacija; doc.dr.sc. Ivica Garašić dipl. ing., Fakultet strojarstva i brodogradnje

- [14] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465220879-0-strojeviopremazazavarivanje_prirucnik_rev.2016_final.pdf, dostupno 19.04.2017.
- [15] Usporedba konvencionalnog i CBT načina prijenosa metala u području prijelaznog luka, Maja Jurica, doc.dr.sc. Ivica Garašić dipl. ing., prof.dr.sc. Zoran Kožuh, Članak, Slavonski Brod, 2015.
- [16] Era, T., Ide, A., Uezono, T., Ueyama, T., Hirata, Y.: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheet joining; *Welding International*, 27(4), 268-273, 2013.
- [17] Era, T., Ide, A., Uezono, T., Yamamoto, H., Ueyama, T.: Spatter reduction of steel sheets welding using controlled bridge transfer (CBT) GMA process, IIW Doc.No. XII-1900-06, 2006.
- [18] Era, T., Uezono, T., Kadota, K., Hata, S., Ueyama, T.: Leading edge of current waveform control technology on digital inverter controlled welding power source and its peripheral equipment; *Zavarivanje* 57, 1/2, 5-16, 2014.
- [19] Era, T.; Uezono, T.; Ueyama, T.; Yamamoto, H.: Development of AC GMA welding system using controlled bridge transfer process, IIW Doc.No. WII-1937-08, 2008.
- [20] Optimizacija prijenosa materijala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Dražen Ilić, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [21] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 465-481, 2015.
- [22] Weller C., Kler R., Piller F. T., Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, *International Journal of Production Economics*, 43-56, 2015.
- [23] Martina F., Williams S.: Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison, *Welding Engineering and Laser Processing Centre*, Cranfield University, 2015.
- [24] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, *Elsevier*, 48-53, 2015.

- [25] J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F.Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B.Prangnell; "The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V"; ELSEVIER; 2016.
- [26] Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P.: Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology, 2016.
- [27] Primjena MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Franjo Dominković, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [28] D. Dong-Hong, P. Zeng-Xi, C. Dominic, L. Hui-Jun; " Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing"; Wollongong University; 2014.
- [29] Addison A., Ding J., Martina F., Lockett W., Williams S.: Manufacture of Complex Titanium Parts using Wire+Arc Additive Manufacture, Titanium Europe 2015, Birmingham, 2015.
- [30] Ding J., Martina F., Williams S.: Production of large metallic components by additive manufacture – issues and achievements, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015.
- [31] Osobna arhiva fotografija
- [32] <http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2331&lang=002>, dostupno 28.4.2017.
- [33] Elektroda Zagreb, katalog
- [34] Norma ISO 6892-1:2009

PRILOZI

I. CD-R disc